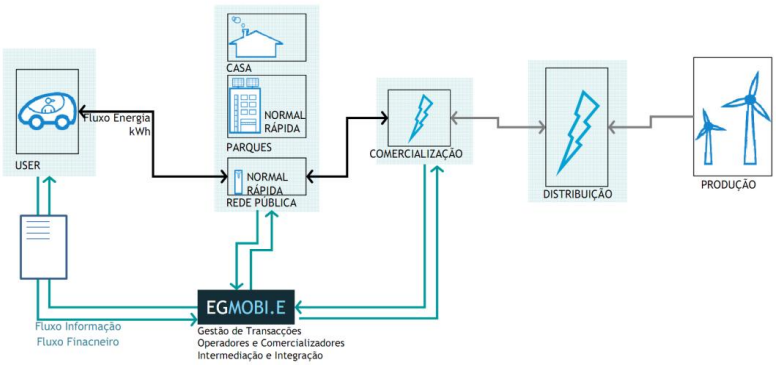
INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
Universidade Técnica de Lisboa



O Veículo Eléctrico e a sua Integração no Sistema Eléctrico

Luís Manuel Martins Gomes

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Júri

Presidente: Prof. Doutor Paulo José da Costa Branco

Orientador: Prof. Doutor João José Esteves Santana

Vogal: Prof. Doutor Duarte de Mesquita e Sousa

Outubro 2010

Agradecimentos

Gostava de agradecer ao meu orientador, Professor Doutor João Santana, por ter aceite este trabalho e pelo entusiasmo demonstrado durante a realização, assim como todo o apoio e ideias.

Queria também agradecer a todas as pessoas, especialmente a todos os amigos e família, que directa ou indirectamente influenciaram o meu percurso académico.

Abstract

Electric vehicles are being presented as a sustainable solution to reduce greenhouse gases (GHG) emissions and oil dependency. The increase in fuel prices also encourages the development and the integration of electrical mobility. However, the success of these vehicles depends on the batteries.

This study analyses the potential impacts of the electric mobility on the Portuguese Electric Utility System. Several scenarios of electric vehicles penetration on the Portuguese LDV (light duty vehicles) fleet and some charging profiles are defined. The power limitations between the grid and the vehicle are analysed and the overall impact on the system is estimated. The increase in demand of electric vehicles battery charging can cause system constraints, especially during peak hours. It is studied the most problematic scenario and the estimation of new generation installation till 2020 and it is concluded that the system can solve all possible constraints. There is the possibility of these vehicles optimize the performance of the system and enable high wind penetration with Vehicle-to-Grid (V2G) applications. The regulation of the wind generation is one example and it is used to reduce the variability of this type of energy.

In terms of electric distribution network, it is analysed the impact of the normal and fast charging. A small network is simulated using the Newton-Raphson Method and the problems that can emerge are identified.

Keywords

Electric Vehicle, Portuguese LDV Fleet, Portuguese Electric Utility System, Emissions, Vehicle-to-Grid, Regulation of Wind Generation, Power Flow, Electric Distribution Network, Newton-Raphson Method

Resumo

Os veículos eléctricos são apresentados como uma solução sustentável na redução das emissões de gases de efeito de estufa (GEE) e da dependência do petróleo. O aumento do preço dos combustíveis favorece o desenvolvimento e integração da mobilidade eléctrica. No entanto, o sucesso destes veículos depende das baterias.

Este trabalho analisa o potencial impacto da mobilidade eléctrica no Sistema Eléctrico Nacional (SEN). São definidos vários cenários de penetração de veículos eléctricos no parque automóvel em Portugal e alguns perfis de carregamento. Analisa-se as limitações de potência entre a rede e o veículo e estima-se o impacto global no SEN. O acréscimo de consumo proveniente do carregamento das baterias dos veículos eléctricos pode causar constrangimentos ao sistema, principalmente se este for realizado durante as horas de ponta. Analisa-se o cenário mais problemático e as estimativas de instalação de geração até 2020 e conclui-se que o SEN consegue dar resposta aos possíveis constrangimentos. Existe a possibilidade de estes veículos optimizarem o funcionamento global do sistema e permitirem elevada penetração eólica com aplicações *Vehicle-to-Grid* (V2G). A regulação da geração eólica é um exemplo e consiste na redução da variabilidade, característica deste tipo de energia.

Ao nível da rede de distribuição de energia eléctrica é analisado o impacto do carregamento normal e rápido. Procede-se à simulação de uma pequena rede usando o Método de Newton-Raphson e determinam-se os problemas que possam surgir.

Palavras-chave

Veículo Eléctrico, Parque Automóvel Nacional, Sistema Eléctrico Nacional, Emissões, Veículo para a Rede, Regulação da Geração Eólica, Trânsito de Energia, Rede de Distribuição de Energia Eléctrica, Método de Newton-Raphson

Índice

1 Introdução 1
1.1 Contexto 1
1.2 Título 1
1.3 Motivação 2
1.4 Contribuição 4
1.5 Estrutura da Dissertação 5

2 Estado de Arte 6
2.1 Introdução 6
2.2 Veículo Convencional 7
2.2.1 ICE 8
2.2.2 Sistema de Travagem 9
2.3 Veículos de Propulsão Eléctrica 10
2.3.1 Veículo Puramente Eléctrico (EV) 10
2.3.2 Veículo Eléctrico Híbrido (HEV) 10
2.3.2.1 Arquitectura 12
2.3.2.2 Classe dos HEVs 14
2.3.3 Veículo Eléctrico Híbrido de Recarregamento pela Rede (PHEV) 15
2.3.3.1 Modos de Operação 16
2.3.3.2 Vantagens/Desvantagens dos PHEVs 18
2.3.4 Veículo a Pilha de Combustível (FCV) 19
2.4 Fontes de Energia 20
2.4.1 Baterias 21
2.4.2 Supercondensadores 23
2.4.3 Pilha de Combustível 23
2.5 Dinâmica do Veículo 24

3 Mobilidade Eléctrica em Portugal 28
3.1 Decreto-Lei n.º 39/2010 28
3.2 Método de Previsão 29
3.3 Estatísticas do Parque Automóvel Nacional 31

3.4 Cenários de Penetração de Veículos Eléctricos em Portugal 36
3.4.1 Mercado 36
3.4.2 Cenários Considerados 38

4 Impacto no SEN e Sustentabilidade dos Veículos Eléctricos 42
4.1 Sistema Eléctrico Nacional (SEN) 42
4.1.1 Características do SEN 43
4.1.2 Renováveis em Portugal 47
4.2 Carregamento dos Veículos Eléctricos 48
4.2.1 Limitações entre a Rede e o Veículo 49
4.2.2 Métodos de Carga 49
4.2.2.1 Por Cabo 49
4.2.2.2 Troca das Baterias 51
4.2.3 Características de Carregamento Considerados 52
4.2.4 Perfis de Carregamento 55
4.3 Impacto no SEN 58
4.4 Sustentabilidade dos Veículos Eléctricos 64
4.4.1 Emissões 64
4.4.2 Custos 68
4.5 Potencial dos Veículos Eléctricos 69
4.5.1 V2G (*vehicle-to-grid*) 69
4.5.2 Regulação da Geração Eólica 71

5 Estudo de um Caso – Impacto na Rede 73
5.1 Trânsito de Energia 73
5.1.1 Valores por Unidade 73
5.1.2 Matriz de Admitâncias Nodais 74
5.1.3 Tipos de Barramento 75
5.1.4 Método de Newton-Raphson 75
5.1.4.1 Algoritmo 75
5.1.4.2 Processo Iterativo 77
5.2 Rede de 5 Barramentos 79

5.2.1 Perfil de Cargas 80
5.2.2 Cenários de Carregamento 80
5.2.3 Simulação 81

6 Conclusões 86
6.1 Perspectiva de Trabalho Futuro 87

Referências Bibliográficas 89

Anexo A Mercado 91
A.1 EVs 91
A.2 HEVs 92

Anexo B Impacto no SEN 93
B.1 Evolução do Parque Automóvel Eléctrico em Portugal 93
B.2 MOBI.E 94
B.3 Evolução da potência térmica instalada em Portugal 95
B.4 Evolução da potência renovável instalada em Portugal 96

Anexo C Parâmetros da rede de distribuição radial de cinco barramentos 98

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Comparação do consumo petrolífero mundial nos países desenvolvidos e em vias de desenvolvimento no sector de transportes e nos restantes [2]. 2

Figura 1.2 – Consumo petrolífero por região [2]. 3

Figura 1.3 – Consumo e reservas de petróleo no Mundo [2]. 3

Figura 2.1 – Funcionamento de um motor de quatro tempos [2]. 8

Figura 2.2 – Pontos de operação de um típico ICE a velocidade constante para a mudança mais alta e a segunda mais alta [2]. 9

Figura 2.3 – Sistema de travagem convencional. 9

Figura 2.4 – Ciclo de condução urbano e em auto-estrada, EPA FTP75 [2]. 12

Figura 2.5 – Arquitecturas comuns dos HEVs. (a) Série, (b) Paralelo, (c) Série-Paralelo e (d) Complexa [2]. 12

Figura 2.6 – Gestão de energia nos HEVs [8]. 14

Figura 2.7 – Ilustração de um PHEV [9]. 16

Figura 2.8 – Modos de operação dos PHEVs [10]. 17

Figura 2.9 – Características de várias fontes de energia (escala logarítmica) [5]. 20

Figura 2.10 – Características de várias tecnologias de baterias [3]. 21

Figura 2.11 – Caracterização das baterias típicas para os diferentes veículos eléctricos [12]. . 22

Figura 2.12 – Exemplos de PHEVs e metas para baterias (a longo prazo) [10]. 22

Figura 2.13 – Forças aplicadas ao veículo [14]. 24

Figura 2.14 – Variação da força de resistência ao rolamento, F_{RR}, da força de resistência aerodinâmica, F_{DA}, e da força resistente total, F_R, com a velocidade. Foram usados os dados da Tabela 2.2. 27

Figura 3.1 – Diagrama da rede de mobilidade eléctrica em Portugal [39]. 28

Figura 3.2 – Exemplo de curva em S de difusão de novas tecnologias. 30

Figura 3.3 – Parque automóvel em Portugal [20]. 31

Figura 3.4 – Venda de veículos em Portugal e preço médio de venda ao público de combustíveis [20], [21]. 32

Figura 3.5 – Variação da venda de veículos nos últimos anos [20]. 32

Figura 3.6 – Venda de veículos por tipo de combustível [20]. 33

Figura 3.7 – Venda mensal de veículos em Portugal nos últimos anos [20]. 34

Figura 3.8 – Idade do parque automóvel em Portugal [20]. 35

Figura 3.9 – Distribuição de veículos por região [20]. 35

Figura 3.10 – Evolução das vendas de veículos ligeiros de passageiros até 2020. 39

Figura 3.11 – Venda de veículos eléctricos para os vários cenários de penetração, Anexo B.1. 41

Figura 4.1 – Evolução da potência de ponta anual e do consumo em Portugal [25]. 44

Figura 4.2 – Diagrama de carga de 12 de Janeiro de 2009 [25]. 44
Figura 4.3 – Diagramas de carga semanais típicos de cada estação em 2009 [25]. 45
Figura 4.4 – Contributo de cada fonte no consumo em 2009 [25]. 46
Figura 4.5 – Velocidade média horizontal a 60 m [m/s] (1999) [30]. 47
Figura 4.6 – Índice kWh/Wp em sistemas fotovoltaicos ligados à rede [31]. 47
Figura 4.7 – Potência eólica total ligada – evolução anual [25]. 48
Figura 4.8 – Pormenor da ficha de acordo com a norma SAE J1772 [36]. 50
Figura 4.9 – Pormenor da ficha de acordo com a norma IEC 62196 [38]. 51
Figura 4.10 – Características de carregamento de veículos eléctricos [39]. 52
Figura 4.11 – Característica de descarga da bateria modelada em [34] com base nas especificações das baterias do Chevrolet Volt. 53
Figura 4.12 – Perfil usado no Cenário 1 – Carregamento Não Controlado; μ = 19h, σ= 1. 56
Figura 4.13 – Perfil usado no Cenário 2 – Carregamento no Vazio; μ = 24h, σ= 1. 57
Figura 4.14 – Perfil usado no Cenário 3 – Carregamento Contínuo; μ = 24h, σ= 1, μ = 10h, σ= 1 e μ = 14h, σ= 1. 57
Figura 4.15 – Evolução da potência instalada no SEN de acordo com [29], Anexo B.3 e B.4. . 58
Figura 4.16 – Diagrama de carga em 2011 de acordo com o carregamento Não Controlado para os vários cenários de penetração de veículos eléctricos. 59
Figura 4.17 – Diagrama de carga em 2015 de acordo com o Carregamento Não Controlado para os vários cenários de penetração de veículos eléctricos. 60
Figura 4.18 – Diagrama de carga em 2015 de acordo com o Carregamento no Vazio para os vários cenários de penetração de veículos eléctricos. 61
Figura 4.19 – Diagrama de carga em 2015 de acordo com o Carregamento Contínuo para os vários cenários de penetração de veículos eléctricos. 61
Figura 4.20 – Diagrama de carga em 2020 de acordo com o Carregamento Não Controlado para os vários cenários de penetração de veículos eléctricos. 62
Figura 4.21 – Diagrama de carga em 2020 de acordo com o Carregamento no Vazio para os vários cenários de penetração de veículos eléctricos. 63
Figura 4.22 – Diagrama de carga em 2020 de acordo com o Carregamento Contínuo para os vários cenários de penetração de veículos eléctricos. 63
Figura 4.23 – Evolução da contribuição de cada fonte de energia para o consumo final de energia eléctrica para o cenário de referência – sem veículos eléctricos. 66
Figura 4.24 – *Mix* energético de Espanha em 2009. Consumo total de 252.772 GWh [41]. 66
Figura 4.25 – Evolução do preço médio diário de combustíveis em Portugal [21]. 68
Figura 4.26 – Estrutura do sistema V2G. P_{ref} e Q_{ref} são os valores de referência de potência activa e reactiva gerados pelo ISO para cada veículo eléctrico. S.N. é o *serial number* de cada veículo. P_{out} e Q_{out} são a potência activa e reactiva reais fornecida por cada veículo. SOC_T corresponde à energia total de um determinado agregado de veículos [42]. 71
Figura 4.27 – Redução da variabilidade de geração eólica (P_W) usando PHEVs [42]. 72
Figura 5.1 – Esquema equivalente em π nominal de uma linha. 74

Figura 5.2 – Fluxograma do processo iterativo para o método de Newton-Raphson [43]. 79
Figura 5.3 – Rede de distribuição radial de 12,66 kV que possui 5 barramentos [44]. 79
Figura 5.4 – Diagrama de carga misto (70% - residencial e 30% - comercial) [44]. 80
Figura 5.5 – Variação do consumo do sistema para os vários cenários. 83
Figura 5.6 – Variação da tensão no barramento 5 para os vários cenários. 83
Figura 5.7 – Variação das perdas na rede de distribuição. 84
Figura A.1 – Tesla Roadster (84000€). 91
Figura A.2 – Venturi Fetish (297000€) edição limitada. 91
Figura A.3 – Chevrolet Volt (84000€). 92

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Valor de f_r para diferentes tipos de piso. 25
Tabela 2.2 – Valores considerados para um veículo típico. 27
Tabela 3.1 – Venda de HEVs em Portugal [20]. 33
Tabela 3.2 – Especificações do Nissan Leaf e Opel Ampera [23], [24]. 37
Tabela 3.3 – Cenários de penetração de veículos eléctricos. 40
Tabela 3.4 – Veículos eléctricos em circulação em Portugal por tipo, Anexo B.1. 41
Tabela 4.1 – Potência instalada em Portugal em 2009 por fonte de energia [25]. 46
Tabela 4.2 – Modos de funcionamento referentes à Norma IEC 62196. 50
Tabela 4.3 – Características de carregamento consideradas (valores arredondados). 53
Tabela 4.4 – Consumo por tipo de carregamento e veículo. 54
Tabela 4.5 – Consumo por tipo de carregamento e veículo – valores usados na determinação do impacto no SEN. 54
Tabela 4.6 – Consumos Considerados. 64
Tabela 4.7 – Emissões específicas [g CO_2/kWh] de CO_2 das centrais termoeléctricas por tecnologia e por combustível, verificadas no CELE, Portugal Continental, 2005 a 2008 [40]. 67
Tabela 4.8 – Emissões específicas [g CO_2/km] de acordo com os consumos considerados. 67
Tabela 4.9 – Preços da energia actualmente em vigor – EUR/kWh [edp]. 69
Tabela 4.10 – Custo do abastecimento dos veículos eléctricos de acordo com os preços da energia em vigor – €/100 km [edp]. 69
Tabela 5.1 – Tipos de barramentos. 75
Tabela 5.2 – Características de carregamento consideradas (valores arredondados). 81
Tabela 5.3 – Número de veículos eléctricos em cada barramento. 81
Tabela 5.4 - Cenários de carregamento. 81
Tabela 5.5 – Variação da potência que transita nas linhas para os vários cenários. 85
Tabela 5.6 – Variação da utilização da capacidade da linha. 85
Tabela A.1 – Alguns modelos EVs actualmente em produção [27], [28]. 91
Tabela A.2 – Alguns modelos HEVs actualmente em produção [27]. 92
Tabela B.1 – Cronograma da entrada em funcionamento das novas CCGT. 95
Tabela B.2 – Estimativa do contributo total previsível de cada tecnologia baseada em fontes de energia renovável e a trajectória indicativa das quotas de energia proveniente de fontes renováveis no sector da electricidade em 2010-2014. 96
Tabela B.3 – Estimativa do contributo total previsível de cada tecnologia baseada em fontes de energia renovável e a trajectória indicativa das quotas de energia proveniente de fontes renováveis no sector da electricidade em 2015-2020. 97
Tabela C.1 – Dados dos barramentos [44]. 98

Tabela C.2 – Dados das linhas [44]. 98

Lista de Abreviações

V2G *Vehicle-to-Grid*

SEN Sistema Eléctrico Nacional

ICE *internal combustion engine*

EV *electric vehicle*

HEV *hybrid electric vehicle*

PHEV *plug-in hybrid electric vehicle*

FCV *fuel cell vehicle*

CD *charge-depleting*

CS *charge-sustaining*

SOC *state of charge*

DOD *depth of discharge*

1 Introdução

1.1 Contexto

O contexto da presente dissertação de mestrado insere-se num dos maiores desafios da sociedade do século XXI – fiabilidade, segurança e sustentabilidade do Sistema Eléctrico e do Sistema de Transportes Rodoviário. Estes sistemas estão sujeitos à volatilidade dos combustíveis fósseis e são os que contribuem para grande parte das emissões de CO_2 em Portugal, assim como acontece na maioria dos países da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (*Organisation for Economic Co-operation and Development* (OECD)) [1]. De forma a combater esta problemática, no Sistema Eléctrico Nacional (SEN) assiste-se à introdução de fontes de energia renovável, maioritariamente energia eólica, fruto dos benefícios económicos e ambientais a elas associados. A nível do consumo e da geração de energia, a eficiência energética está cada vez mais na ordem do dia. No Sistema de Transportes Rodoviário surgem os biocombustíveis como alternativa aos combustíveis de origem fóssil. São um tipo de energia renovável, de origem biológica, mas que revelam problemas ambientais, sociais e económicos (de realçar o paradigma desflorestação-cultivação e o aumento do preço do milho e do trigo). Actualmente, é na mobilidade eléctrica onde reside a esperança de alcançar uma solução a curto e médio-prazo e com efeitos imediatos. As baterias são o tipo de armazenamento de energia mais usado nos veículos eléctricos e constituem a grande barreira tecnológica, porém, as mais recentes tecnologias à base de Lítio apresentam características promissoras. Tudo indica que será em 2011 que os veículos eléctricos de nova geração começarão a chegar ao mercado.

1.2 Título

Com a tese “O Veículo Eléctrico e a sua Integração no Sistema Eléctrico” pretende-se analisar o potencial do veículo eléctrico em Portugal.

Actualmente o Sistema Eléctrico Nacional (SEN) e o Sistema de Transportes Rodoviário são a base de qualquer sociedade e funcionam isoladamente. O desenvolvimento do veículo eléctrico, como resultado da maturação de diversas tecnologias (motor eléctrico, electrónica de potência, técnicas de controlo, baterias, etc.) e ainda alvo de vários estudos, permite a sua interligação à rede para efeitos de carga. Surge ainda um novo conceito, V2G (*vehicle-to-grid*), que permite um fluxo bidireccional de energia entre a rede e o veículo e está associado ao aumento de armazenamento nos veículos eléctricos e à falta deste no SEN.

1.3 Motivação

O desenvolvimento dos veículos com motor de combustão interna (*internal combustion engine* (ICE)) representa um dos maiores sucessos da sociedade. Os veículos têm sido indispensáveis no crescimento da sociedade moderna satisfazendo as necessidades de mobilidade no dia-a-dia. No entanto, a circulação de automóveis em todo o mundo é grande parte responsável pela degradação da qualidade do ar e do aquecimento global.

A maioria dos combustíveis usados no sector de transportes provém do petróleo, Figura 1.1, e este, por sua vez, resulta da decomposição de matéria orgânica aprisionada há milhões de anos (600-400) em camadas geologicamente estáveis. É por esta razão que este tipo de recurso é finito. Grande parte da produção petrolífera está localizada no Médio Oriente e os principais consumidores são a Europa, América do Norte e Ásia-Pacífico, Figura 1.2. Desta situação resulta uma necessidade de importação por parte dos países consumidores, criando um elo de dependência com os países produtores. O consumo deste tipo de energia está em constante crescimento, de modo a acompanhar tanto a economia dos países desenvolvidos, como em desenvolvimento. De salientar ainda a previsão de um grande aumento de consumo, com o rápido desenvolvimento de países populosos, nomeadamente na região Ásia-Pacífico e Brasil, assim como um acréscimo proporcional de emissões poluentes e de CO_2 [2].

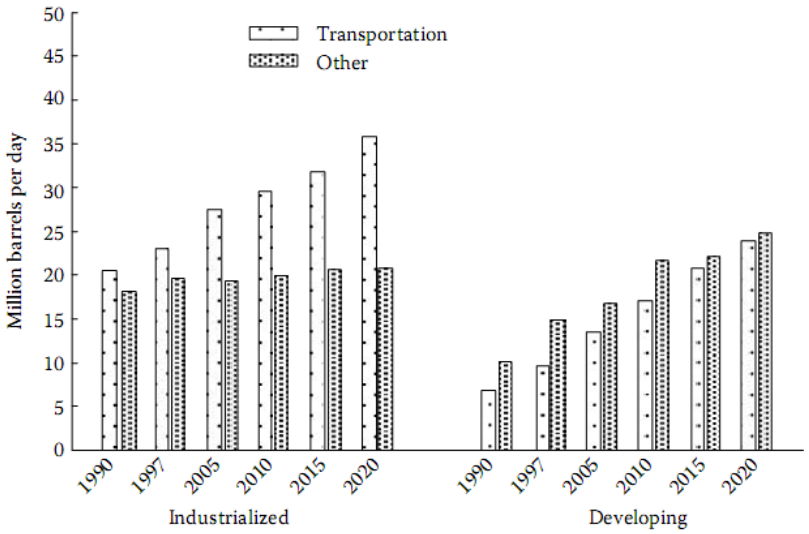


Figura 1.1 – Comparação do consumo petrolífero mundial nos países desenvolvidos e em vias de desenvolvimento no sector de transportes e nos restantes [2].

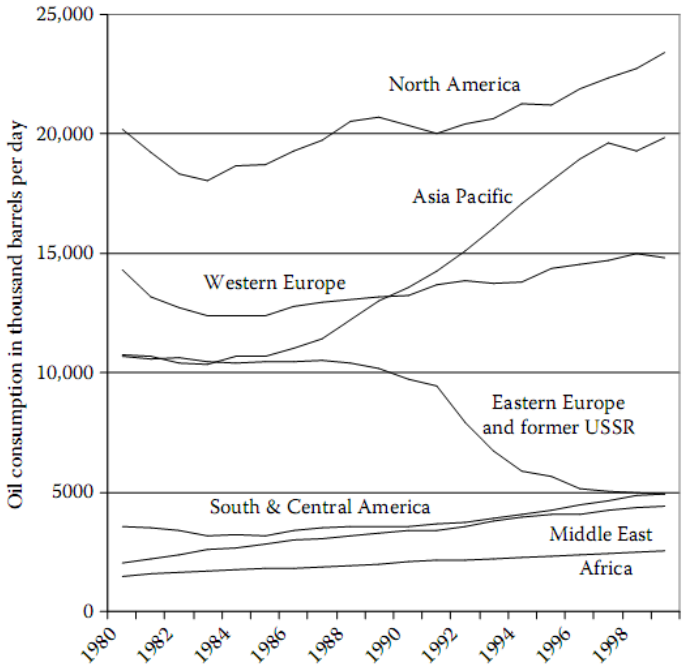


Figura 1.2 – Consumo petrolífero por região [2].

Combinando a taxa de crescimento da população mundial com o número de veículos em circulação e tendo em conta o consumo e a descoberta de novos recursos petrolíferos, antevê-se que o fim deste recurso poderá estar próximo, Figura 1.3. Como resultado, a regulação de emissões devido à poluição atmosférica e ao aquecimento global, o esgotamento dos recursos petrolíferos e, consequentemente, a economia dos combustíveis, são actualmente problemas de prioridade máxima [2].

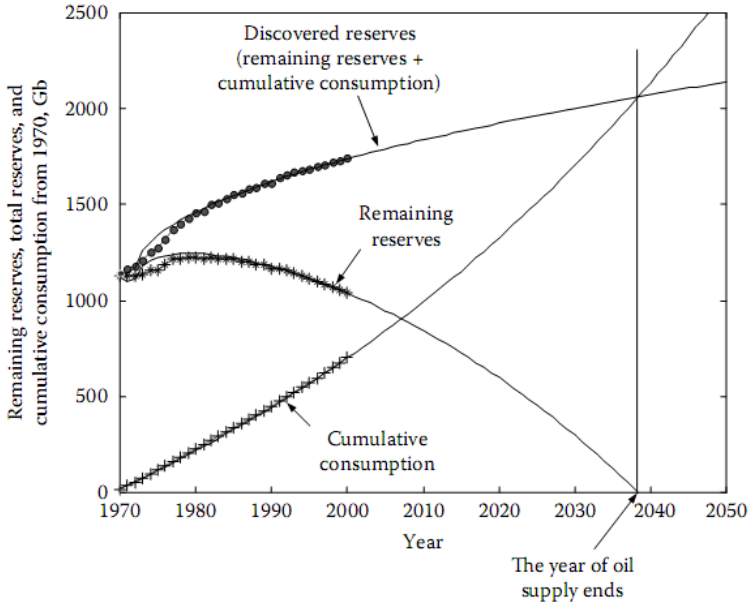


Figura 1.3 – Consumo e reservas de petróleo no Mundo [2].

Nas últimas décadas, actividades de investigação e desenvolvimento relacionadas com a sustentabilidade do Sistema de Transportes Rodoviário – mais seguro, mais eficiente e mais limpo – tornam os veículos eléctricos como a derradeira alternativa aos veículos convencionais. A ideia centra-se em transferir parte do consumo de energia dos veículos em circulação para a rede eléctrica, de tal modo que a energia fornecida a estes, pela rede, tenha origem em fontes de energia renovável e nuclear e seja fornecida durante as horas de vazio de forma a minimizar investimentos em transmissão, distribuição e geração adicional. As emissões resultantes da produção de energia eléctrica para efeitos de carregamento dos veículos eléctricos são centralizadas (centros electroprodutores) e, por isso, mais fáceis de controlar.

O Sistema Eléctrico tornou-se a base de qualquer sociedade moderna. A electricidade está presente em todos os aparelhos que nos facilitam e transformam o nosso quotidiano a nível doméstico ou no trabalho. Note-se que, como forma de energia, apresenta inúmeras características vantajosas: flexibilidade, devido à facilidade em se transformar noutros tipos de energia; eficiência, que se traduz no elevado rendimento da transformação entre formas de energia; transportabilidade, devido à facilidade no transporte [3].

Com este trabalho pretende-se realizar um estudo sobre o possível impacto dos veículos eléctricos no SEN. A união do Sistema Eléctrico e do Sistema de Transportes Rodoviário tem potencial para ser o maior e mais complexo sistema criado pelo homem. Trata-se, portanto, de uma oportunidade única de trabalho num tema actual, aliciante e com grande potencial para alterar a vida das populações.

1.4 Contribuição

Em primeiro lugar é realizada uma retrospectiva à mobilidade eléctrica de forma a identificar os pontos fortes e fracos de cada solução construtiva. Serve como uma parte introdutória ao tema, em que são apresentadas várias tecnologias e conceitos.

Os objectivos principais deste trabalho são a análise do potencial impacto da mobilidade eléctrica no SEN e na rede de distribuição.

A nível do SEN, pretende-se determinar a influência que os perfis de carregamento têm no sistema e analisar se a instalação prevista de geração até 2020 é adequada. Realiza-se uma estimativa rápida sobre a viabilidade dos veículos eléctricos nos paradigmas: preço de electricidade *vs* combustíveis e emissões do veículo eléctrico (*mix* energético nacional) *vs* veículo convencional. São ainda apresentados serviços que a mobilidade eléctrica pode fornecer à rede, de forma a optimizá-la e permitir elevada penetração de energia eólica.

Na rede de distribuição é avaliado o impacto do carregamento normal e rápido. Este estudo permite prever possíveis problemas e soluções, do ponto de vista da distribuição de energia eléctrica e da entidade reguladora, de forma a optimizar a penetração dos veículos eléctricos no país sem grandes constrangimentos no sector eléctrico.

1.5 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação é constituída por seis capítulos e três anexos. O primeiro, e actual capítulo, serve como introdução ao documento, onde é descrito o contexto em que surge este trabalho e são definidos os objectivos, assim como a respectiva contribuição.

O capítulo 2 inicia-se com uma abordagem ao princípio de funcionamento dos veículos convencionais. Posteriormente é caracterizado o estado de arte dos vários tipos de veículos eléctricos e das fontes de energia. Por fim, realiza-se uma análise à dinâmica do veículo de forma a identificar as variáveis que mais influenciam o seu consumo energético.

O objectivo do capítulo 3 é estimar a evolução da mobilidade eléctrica em Portugal. É analisado o documento que define a sua legislação, o Decreto-Lei n.º 39/2010, de forma a identificar informação relevante para o estudo. São analisadas as características do parque automóvel nacional e as futuras soluções de mobilidade eléctrica que irão surgir no país. No final do capítulo são definidos os cenários de penetração de veículos eléctricos e é caracterizado o parque automóvel eléctrico até 2020.

No capítulo 4 procede-se ao estudo do impacto da mobilidade eléctrica no SEN. Em primeiro lugar analisam-se as características do SEN, tal como a capacidade instalada, o consumo final por tipo de fonte de energia e os perfis dos diagramas de carga. São depois indicadas as possíveis soluções a usar no carregamento dos veículos eléctricos e definidas as características usadas na simulação. O estudo do impacto da mobilidade eléctrica no SEN é realizado após a definição dos cenários de carregamento, ou seja, quando e quantos veículos estão em carregamento. Realiza-se uma breve análise à sustentabilidade dos veículos eléctricos, em termos económicos e ambientais. Por fim, é indicado o potencial destes veículos em fornecer serviços que visam melhorar o desempenho global do sistema eléctrico.

No capítulo 5 realiza-se o estudo do impacto do carregamento normal e rápido ao nível da rede de distribuição. É usado o Método de Newton-Raphson no cálculo do trânsito de energia numa pequena rede de distribuição, com cinco barramentos.

As conclusões do trabalho e as perspectivas de trabalho futuro são apresentadas no capítulo 6.

2 Estado de Arte

2.1 Introdução

O veículo está associado a um meio de transporte que permite a mobilidade de pessoas e bens. Para este trabalho restringe-se esta definição aos veículos rodoviários ligeiros.

Os veículos equipados com ICE já existem há mais de cem anos. O seu princípio de funcionamento resulta de ciclos termodinâmicos e do uso do combustível para gerar energia mecânica. Nos últimos anos tem-se assistido ao amadurecimento tecnológico deste tipo de motor com vista a aumentar a sua eficiência e reduzir as emissões produzidas. Os avanços devem-se sobretudo à electrónica automóvel. No entanto, o aumento do número de veículos em circulação e, por sua vez, as emissões por eles produzidas representam uma ameaça ao ambiente e à saúde pública. O actual Sistema de Transportes Rodoviário apresenta problemas energéticos e ambientais e precisa de alternativas – mobilidade sustentável. É assim que surge a aposta nos veículos eléctricos.

É de acordo com o tipo de propulsão usado, motor de combustão interna (ICE) ou motor eléctrico, que surge a barreira entre o veículo convencional e o eléctrico[1]. Os veículos eléctricos são apontados como a solução ou uma solução intermediária, pois usam uma fonte de energia alternativa, a energia eléctrica. Estes podem ser a baterias ou puramente eléctricos (*electric vehicles* (EVs))[2], veículos eléctricos híbridos (*hybrid electric vehicles* (HEVs))[3], veículos eléctricos híbridos de recarregamento pela rede (*plug-in hybrid electric vehicles* (PHEVs)) e veículos eléctricos a pilha de combustível (*fuel cell vehicles* (FCVs)). Estas soluções encontram-se em distintos estados de desenvolvimento, existindo desafios e soluções à medida para cada tipologia. O seu sucesso depende do desenvolvimento tecnológico na área dos conversores de potência, máquinas eléctricas, gestão de energia, técnicas de controlo e, sobretudo, armazenamento de energia. Além disso, a falta de infra-estruturas públicas para o carregamento de veículos eléctricos pode constituir uma barreira ao início da sua comercialização.

No desenvolvimento de um veículo eléctrico, há que ter em conta diversos factores. São eles [2], [4], [5]:

Chassis/Carroçaria – Existem dois tipos de abordagens na concepção de um veículo eléctrico: conversão de um veículo ICE ou construído de raiz em que ambas as soluções

[1] Na literatura, a designação de veículo eléctrico refere o veículo dotado de propulsão eléctrica, mesmo que possua outro tipo de propulsão.
[2] Na literatura também é usado o termo de veículo eléctrico a baterias (*battery electric vehicle* (BEV)).
[3] Na literatura define-se veículo eléctrico híbrido (HEV) como o veículo que possui um motor eléctrico e um ICE. Para os veículos que usam mais que uma fonte de energia (definição de híbrido), surgiram novos termos para os mencionar [4].

apresentam vantagens. A primeira torna-se económica para um volume de produção baixo, com a utilização do chassis do veículo ICE, mas como resultado, o veículo pode apresentar um centro de gravidade elevado e uma distribuição de peso não uniforme. A segunda abordagem, actualmente a mais utilizada, permite aos engenheiros a flexibilidade de coordenar e integrar vários sub-sistemas do veículo de modo a aumentar a eficiência global do sistema. Com o objectivo de manter/melhorar o desempenho aerodinâmico deste tipo de veículo, poder-se-á usar materiais mais leves, tais como, alumínio e materiais compósitos, de modo a compensar o acréscimo de peso por parte das fontes de energia.

Motor Eléctrico – São desejados motores eléctricos com elevada densidade de binário e potência, alto rendimento para um grande intervalo de velocidades, robusto, seguro e de baixo custo. Usualmente são usados motores AC trifásicos. As especificações do motor dependem da tipologia do veículo.

Conversores de Potência – Desenvolvimento de rectificadores, inversores e conversores DC/DC adequados e de baixo custo.

Fontes de Energia – Análise das especificações dos dispositivos de armazenamento de energia disponíveis no mercado. A nível de baterias, as tecnologias mais promissoras revelam-se como as baterias de hidreto metálico de níquel (NiMH) e iões de lítio (Li-Ion). O potencial do uso de múltiplas fontes de energia já é conhecido nos veículos eléctricos híbridos (HEV). Os supercondensadores também poderão desempenhar um importante papel no aumento da eficiência global dos veículos eléctricos.

Técnicas de Controlo – Existem dois tipos de controlo com objectivos distintos [6], [7].

- Controlo de Gestão de Energia – de forma a optimizar a eficiência energética e as emissões do veículo. O objectivo é conceber algoritmos adequados ao tipo de veículo e às suas fontes de energia com baixo peso computacional e que permita uma gestão inteligente de todo o fluxo de energia.
- Controlo de Condução – para optimizar o desempenho conjunto do veículo, por exemplo, ter o binário máximo sempre disponível.

2.2 Veículo Convencional

Nos dias de hoje, o veículo convencional é caracterizado pelo seu ineficiente motor de combustão interna (ICE), isto porque apenas 30% da energia do combustível é realmente aproveitada. Além disso, da combustão da mistura ar e combustível surgem produtos (dióxido de carbono, CO_2, óxidos de azoto, NO_x, monóxido de carbono, CO, e hidrocarbonetos por queimar, HC), que degradam a qualidade do ar e contribuem para o efeito de estufa [8], [2].

Procede-se agora à análise do ICE e do sistema de travagem do veículo convencional, de modo a realçar a falta de eficiência destes sistemas.

2.2.1 ICE

É no motor que ocorre a conversão de energia[4] e é normalmente este que determina a eficiência do veículo. Existem vários tipos de ICE, no entanto, para o presente trabalho considera-se que o veículo convencional está equipado com o ICE de quatro tempos (também conhecido como ciclo de Otto), pois este é relativamente eficiente, barato e fácil de abastecer. Apresenta-se de seguida e de forma abreviada o funcionamento deste motor [2]:

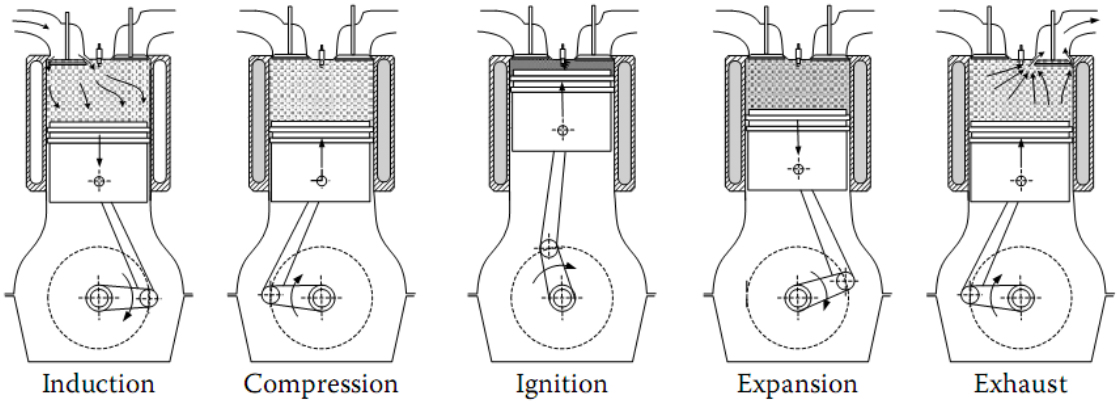


Figura 2.1 – Funcionamento de um motor de quatro tempos [2].

1. Admissão (*Induction*): Abertura da válvula de admissão e descida do êmbolo - admissão da mistura ar + combustível.

2. Compressão (*Compression*): Subida do êmbolo - compressão da mistura. Quando o pistão atinge o topo, a vela de ignição gera uma faísca - ocorre a combustão (*Ignition*) rápida da mistura, o que implica o aumento da pressão com a explosão.

3. Expansão (*Expansion*): Descida do êmbolo - expansão da mistura queimada.

4. Exaustão (*Exhaust*): Abertura da válvula de exaustão e subida do êmbolo - diminuição da pressão e exaustão dos gases.

Na Figura 2.2 representam-se os pontos de operação de um motor a velocidade constante para a mudança mais alta e a segunda mais alta. São indicadas as linhas de igual

[4] Conversão em energia mecânica a partir de gasolina, gasóleo, gás, electricidade, etc.

consumo específico de gasolina (g/kWh), assim como a linha de operação económica (*Optimum economy line*). Verifica-se que a eficiência do motor é superior nas mudanças mais altas.

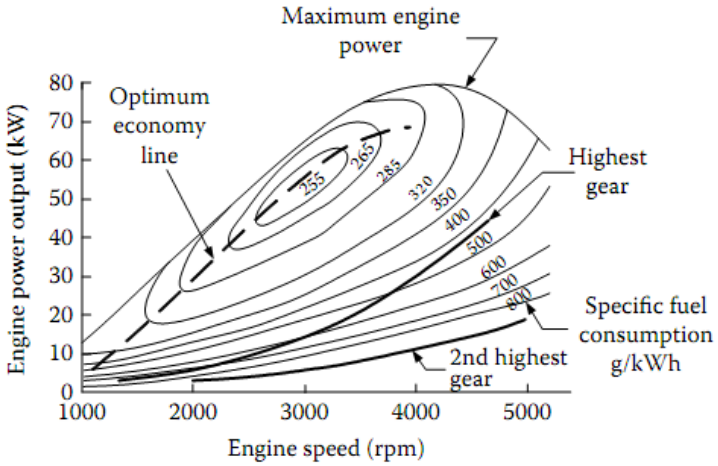


Figura 2.2 – Pontos de operação de um típico ICE a velocidade constante para a mudança mais alta e a segunda mais alta [2].

Da análise desta situação, conclui-se que existe uma necessidade de "apoio" por parte do ICE para tornar o seu funcionamento mais eficiente. Um motor eléctrico pode auxiliá-lo permitindo que este opere o mais próximo da linha de operação económica, originando uma diminuição do consumo de combustível e também de emissões e, como resultado, aumenta-se a eficiência global do sistema. É desta análise que surgem as estratégias de optimização do funcionamento do motor ICE em conjunto com outras fontes de energia e tipo de propulsão.

2.2.2 Sistema de Travagem

A travagem do veículo convencional, Figura 2.3, resulta da conversão de energia mecânica em calor, que é depois dissipado no ar. A força de pressão das pastilhas contra os discos das rodas é criada através de pressão hidráulica ao pressionar o pedal do travão. Percebe-se que existe desperdício de energia mecânica que poderia, de alguma maneira, ser recuperada.

Figura 2.3 – Sistema de travagem convencional.

2.3 Veículos de Propulsão Eléctrica

2.3.1 Veículo Puramente Eléctrico (EV)

O EV foi inventado em 1834 e foi alvo de produção por parte de algumas empresas na última década do século XIX, mas as limitações associadas às baterias e o rápido desenvolvimento dos veículos ICE, fizeram com que estes acabassem por "desaparecer". No início dos anos 70, durante a crise energética, o interesse neste tipo de veículo voltou e, apesar dos avanços tecnológicos associados às baterias e à electrónica de potência, os obstáculos à comercialização do EV mantinham-se [2], [5].

Nos dias de hoje, as limitações dos EVs permanecem. O EV é tipicamente um veículo pequeno, leve e alimentado por baterias, que são recarregadas pela rede e por travagem regenerativa (*regenerative breaking*). Tornam-se ideais para deslocações curtas e para uma condução citadina. São caracterizados por terem emissões nulas [5], alto desempenho energético, silenciosos, baixa autonomia, custo elevado, tempo de recarga elevado, espaço insuficiente para pessoas e mercadoria e por não dependerem dos combustíveis fósseis. É por estas razões que este tipo de veículo fica maioritariamente limitado a certas aplicações, tais como alguns modelos de carrinhos de golf, veículos utilizados em aeroportos e empilhadoras. Além disso, não é de estranhar que nos últimos anos a indústria automóvel tenha apostado na pesquisa de outras soluções. Existem diferentes arquitecturas na concepção de um EV: com um único motor eléctrico, um motor eléctrico em cada roda dianteira, um motor eléctrico em cada roda traseira e um motor eléctrico em cada roda.

Sabe-se que a bateria é o principal obstáculo à comercialização dos veículos eléctricos em geral, no entanto, os avanços tecnológicos nesta área têm sido bastante promissores com a tecnologia à base de Lítio. A falta de infra-estruturas eléctricas públicas para efeitos de carregamento, também se revela como um problema, quando se tem em conta a autonomia e o tempo de carregamento dos EVs. Já é possível conceber veículos eléctricos com o mesmo desempenho que os convencionais em termos de aceleração e velocidade máxima e as baterias actuais já podem ser usadas em veículos leves e se se limitar o uso a pequenas distâncias, Anexo A.1 [4], [5].

2.3.2 Veículo Eléctrico Híbrido (HEV)

O conceito de HEV já é tão antigo como o de automóvel, no entanto, as primeiras configurações não tinham o propósito de diminuir o consumo de combustível, mas sim de

[5] As emissões locais são nulas, mas dever-se-á ter em consideração as emissões provenientes da produção da energia usada pelas baterias.

assistir o ICE para fornecer um certo nível de desempenho aceitável. Isto porque houve uma altura em que a engenharia dos motores eléctricos estava mais avançada que a engenharia do ICE. Mais uma vez, estas configurações acabaram por "desaparecer" com o rápido desenvolvimento do ICE. O interesse no conceito de HEV voltou nos anos 90, quando se tornou claro que os EVs não conseguiam atingir os objectivos pretendidos como alternativa energética. A indústria automóvel virou as suas atenções para este tipo de veículo eléctrico e, poucos anos depois, foram lançados no mercado alguns modelos [2].

Actualmente, o HEV resulta de uma solução intermediária entre o EV e o veículo ICE de modo a compensar as desvantagens de cada um e tirar proveito das vantagens. O Toyota Prius, o Honda Insight e o Honda Civic Hybrid são a prova do sucesso dos HEVs. Estes veículos são caracterizados por terem emissões inferiores e menor consumo de combustível em comparação aos veículos convencionais, devido à optimização do funcionamento do ICE e à recuperação de energia cinética durante a travagem[6] – travagem regenerativa (*regenerative breaking*). O controlo do ICE é optimizado ao ajustar a sua velocidade e binário, podendo resultar numa redução de manutenção. Contudo, este tipo de veículos depende dos combustíveis fósseis, têm um maior custo (introdução do motor eléctrico, sistemas de armazenamento de energia e conversores de potência) e o aumento de eficiência e a redução de emissões dependem do nível de potência do motor e das baterias usadas, assim como do ciclo de condução [5].

Na Figura 2.4 representa-se o ciclo de condução EPA FTP75[7] em meio urbano (*Urban driving*) e em auto-estrada (*Highway driving*) usado nos Estados Unidos [2]. Em ambiente urbano, a velocidade média ronda os 35 km/h e existem vários intervalos de elevada aceleração, assim como de desaceleração, devido às limitações de velocidade, trânsito, semáforos, etc. Em auto-estrada, a velocidade raramente é inferior aos 50 km/h e, durante o percurso, os intervalos de aceleração e desaceleração são bastante inferiores que no caso anterior, isto porque nas auto-estradas os limites de velocidade são superiores e geralmente existe maior fluidez do trânsito. Este exemplo serve apenas para demonstrar a potencialidade do HEV, quanto ao modo de condução.

Os HEVs usam um ICE e um motor eléctrico, de modo a aumentar a autonomia e a eficiência total do veículo, respectivamente. A componente eléctrica do veículo pode funcionar como motor, principalmente em baixas rotações quando o ICE tem baixo rendimento[8], ou como gerador, durante a travagem regenerativa (*regenerative breaking*) ou da energia excessiva produzida pelo ICE. Além da bateria, poderão existir outras fontes de energia no veículo, designadamente, sistemas de volantes de inércia ou supercondensadores, com o objectivo de melhorarem o funcionamento do sistema. Existe, no entanto, a necessidade de conceber

[6] Em vez de esta ser dissipada como calor no caso dos veículos convencionais.
[7] Vários ciclos de condução têm sido desenvolvidos para simular condições reais de condução.
[8] Se o veículo estiver parado ou a funcionar abaixo de um limite o ICE pode ser desligado, no entanto, o abuso desta situação poderá originar um aumento de emissões.

algoritmos de controlo inteligente e estratégias de gestão de energia de modo a optimizar a operação do sistema para qualquer condição de condução [4], [5], [3].

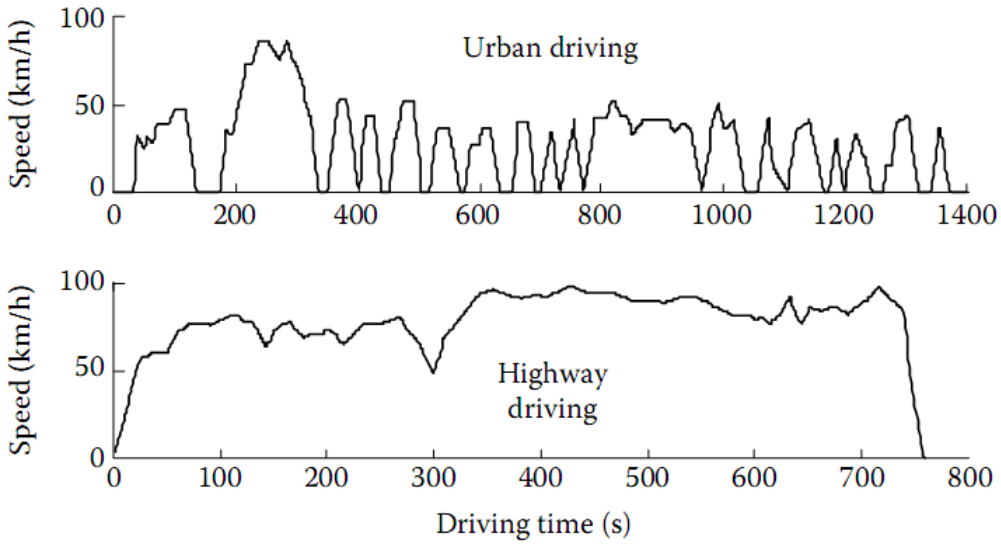


Figura 2.4 – Ciclo de condução urbano e em auto-estrada, EPA FTP75 [2].

2.3.2.1 Arquitectura

Na Figura 2.5 estão representadas as arquitecturas comuns dos HEVs.

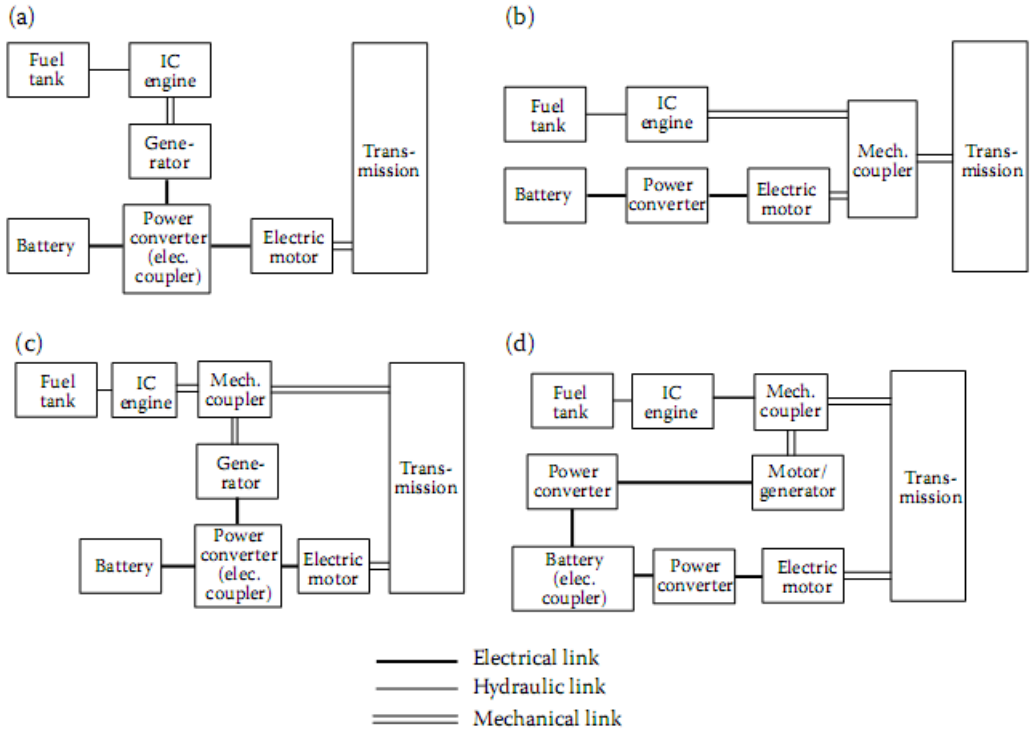


Figura 2.5 – Arquitecturas comuns dos HEVs. (a) Série, (b) Paralelo, (c) Série-Paralelo e (d) Complexa [2].

(a) Série

Na arquitectura série, um gerador converte a energia mecânica do ICE em energia eléctrica. Esta energia é depois usada para carregar a bateria ou para a propulsão através do motor, que está ligado mecanicamente à transmissão, resultando num veículo eléctrico assistido por um ICE. Existe a vantagem de haver flexibilidade na colocação do ICE, devido ao desacoplamento com as rodas, mas, em contrapartida, são necessários três engenhos de propulsão, motor eléctrico, ICE e gerador, resultando numa eficiência mais baixa em comparação com as outras arquitecturas. Torna-se necessário também, o dimensionamento dos sistemas de propulsão para a potência máxima, caso se considere que a bateria pode não entrar na tracção, caso contrário, o gerador e o ICE podem ser subdimensionados [5].

Esta arquitectura comporta-se melhor dentro das cidades, porque usa frequentemente a parte eléctrica, do que em longas distâncias, devido ao uso da cadeia completa que induz maiores perdas de transmissão.

São agora indicados os modos de operação na arquitectura série:

1. ICE desligado e propulsão apenas pelo motor eléctrico com bateria
2. ICE+Gerador+Motor
3. ICE+Gerador+Bateria+Motor
4. ICE+Gerador dividem a potência pelo motor e para carga da bateria
5. Carga estacionária da bateria
6. Travagem Regenerativa

(b) Paralelo

Na arquitectura paralelo, o ICE e o motor eléctrico estão ambos ligados à transmissão, logo a potência pode ser fornecida por ambos, ou por um deles isoladamente. O motor eléctrico funciona como gerador durante a travagem regenerativa ou quando a potência fornecida pelo ICE é superior à necessária à tracção. As vantagens desta arquitectura face à série são o uso de apenas dois sistemas de propulsão e, para debitar a mesma potência, o ICE e o motor eléctrico podem ser subdimensionados. Existem várias possibilidades de operação e o motor eléctrico pode desempenhar diferentes funcionalidades, dependendo da sua potência [5].

1. Apenas motor eléctrico na tracção
2. Apenas ICE na tracção
3. ICE+motor eléctrico na tracção
4. ICE na tracção e carga da bateria
5. Carga da bateria estacionária
6. Travagem Regenerativa

(c) Série-Paralelo

Este tipo de arquitectura envolve as características de ambos os modos. É contudo necessário o recurso a meios adicionais: um veio mecânico comparativamente à configuração série e um gerador relativamente à configuração paralelo, o que torna este tipo de arquitectura mais cara e complexa [5].

(d) Complexa

Este tipo de arquitectura envolve uma configuração complexa, que não pode ser classificada nas últimas três. É semelhante à configuração Série-Paralelo, embora diferente, porque o gerador pode comportar-se como motor [5].

A Figura 2.6 representa um exemplo de operação de um HEV, onde são evidenciados os pontos de operação principais.

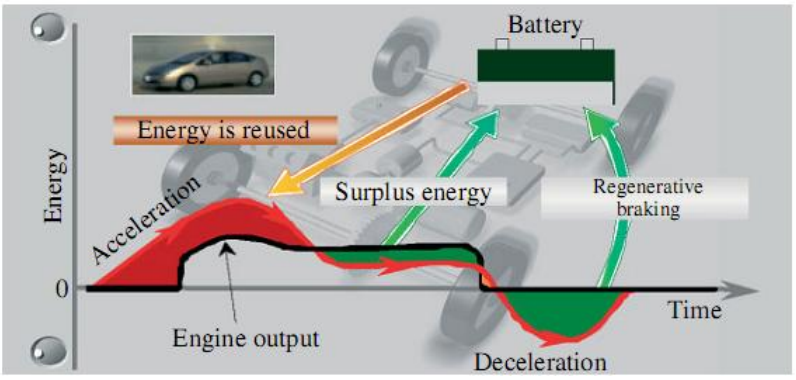


Figura 2.6 – Gestão de energia nos HEVs [8].

2.3.2.2 Classe dos HEVs

Os HEVs podem ser classificados nas seguintes categorias de acordo com o nível de potência do motor eléctrico e da sua funcionalidade.

Mini: motor eléctrico de cerca de 2.5 kW a 12V, que tem a funcionalidade de fazer os arranques, conseguindo-se cerca de 5% a 10% mais eficiência [5].

Mediano: motor eléctrico de cerca de 10-20 kW a 100-200 V. O motor é desenhado para ser directamente incorporado na transmissão e para ter elevada inércia para fins de auxílio ao ICE. Este tipo de motor eléctrico é característico da arquitectura paralelo, em que se consegue poupar cerca de 20% a 30% de energia em condução de cidade [5].

Completo: motor eléctrico de 50kW e 200-300V, normalmente associado à arquitectura série-paralelo ou complexa, em que se podem ter todas as combinações possíveis entre o funcionamento ou não dos motores. Note-se que existe a tentativa de optimizar a eficiência energética através do regime de funcionamento mais apropriado a cada situação, apenas motor eléctrico, apenas ICE ou operação conjunta. Nesta classe, o motor eléctrico pode desempenhar todos os tipos de funções: arranque, auxílio ou funcionamento isolado. Tipicamente em condução cidade poupa-se 30%, embora o custo do veículo se agrave por 30% a 40%. Existem ainda duas subcategorias, PowerHybrid e SynergyHybrid, em que a diferença está no facto do ICE ser subdimensionado à custa de desempenho em troca de eficiência ou vice-versa, respectivamente [5].

De acordo com o reabastecimento de energia, o HEV pode ser classificado como:

- Reabastecimento na estação de serviço: a maioria dos HEVs presentes no mercado é deste tipo, em que o reabastecimento à base de gasolina é realizado nas estações de serviço.
- PHEV: Neste caso o veículo é maioritariamente reabastecido pela electricidade da rede eléctrica. Devido à importância deste veículo será discutido no próximo ponto.

Actualmente o desenvolvimento dos híbridos dá-se em dois sentidos:

- Desenvolvimento de um HEV completo *plug-in* (PHEV) com grande eficiência energética e emissões reduzidas, mas com um preço superior aos veículos convencionais.
- Desenvolvimento de HEVs mini ou medianos com estrutura simples e baixo custo.

No Anexo A.2 encontra-se uma listagem de alguns modelos HEVs no mercado.

2.3.3 Veículo Eléctrico Híbrido de Recarregamento pela Rede (PHEV)

O PHEV, Figura 2.7, é um HEV com a opção de recarregamento das baterias pela rede eléctrica (*plug-in*), ou seja, é um HEV completo. De acordo com a IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), um PHEV deverá ter uma bateria de pelo menos 4 kWh, um método de recarregamento da bateria por uma fonte de energia eléctrica exterior e uma autonomia mínima de 16 km (10 miles), em apenas modo eléctrico [9]. Apesar de existirem outras definições de PHEV, a definição apresentada parece a mais completa, pois restringe a

designação de PHEV, apelando a uma autonomia eléctrica mínima (bateria de maior capacidade que nos HEVs). Pretende-se com esta medida estabelecer mínimos, de modo a usufruir das vantagens deste tipo de veículo.

Figura 2.7 – Ilustração de um PHEV [9].

2.3.3.1 Modos de Operação

O modo de operação do veículo determina o tipo e o tamanho da bateria de acordo com o seu método de descarga.

Charge-depleting (CD) – Neste modo, a energia armazenada nas baterias é usada para alimentar o PHEV. A carga da bateria vai diminuindo (*state of charge*[9] (SOC)) até atingir um nível mínimo (*threshold*). Nessa altura, o veículo passa a funcionar no modo *charge-sustaining* (CS).

Blended – O modo CD pode ser concebido para usar apenas a energia das baterias ou em conjunto com o ICE. Este último modo é designado por *blended* e é normalmente utilizado por veículos que não têm energia eléctrica suficiente para manter velocidades altas e precisa, por isso, do auxílio do ICE. Como resultado, as baterias dos veículos que usam este modo não são tão potentes como as do modo CD.

Charge-sustaining (CS) – Resulta do melhor desempenho do sistema global – ICE e motor eléctrico. Neste caso, a potência na bateria estará dentro de uma banda e terá tendência para manter a carga, usando para esse efeito o ICE como propulsão principal (híbrido convencional).

Na literatura, um PHEV é caracterizado pela sua autonomia no modo CD, i.e., PHEV-[milhas] ou PHEV[quilómetros] (PHEV16 tem uma autonomia de 16 km). Esta designação não

[9] É a razão entre a energia actual da bateria e a sua capacidade máxima expressa em percentagem. De modo a aumentar o tempo de vida de bateria, o SOC não deve descer abaixo de 20%.

distingue o modo de operação no modo CD eléctrico e blended, nem as condições de condução. A determinação da autonomia no modo CD (e do consumo de combustível) depende dos ciclos de condução (perfis de aceleração, travagem e velocidade) e dever-se-á definir padrões de modo a promover comparações de desempenho. São exemplos os ciclos definidos pela EPA (*US Environmental Protection Agency*), o modo UDDS (*Urban Dynamometer Driving Schedule*) para ambiente urbano e HWFET (*The Federal Highway Schedule*) para auto-estrada.

Na Figura 2.8 são indicados os modos de operação referidos. Como se pode observar, no modo CD, o SOC das baterias sofre pequenas oscilações, mas com clara tendência decrescente. No modo puramente eléctrico, as baterias são carregadas apenas durante a travagem regenerativa, enquanto que, no modo blended são também carregadas pelo excesso de energia fornecida pelo ICE. No modo CS, o SOC é mantido num intervalo e as suas oscilações resultam dos mesmos motivos que no modo blended, mas com limitação de SOC mínimo.

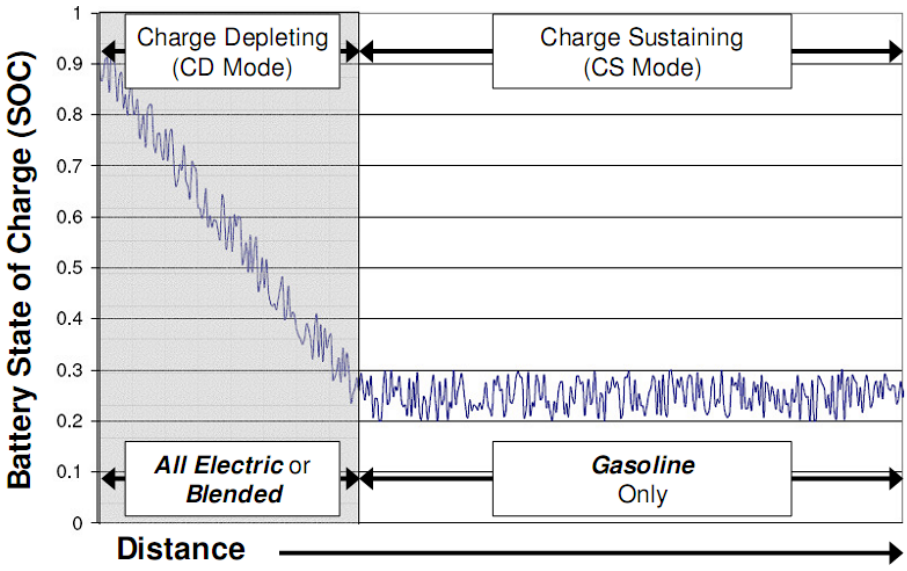


Figura 2.8 – Modos de operação dos PHEVs [10].

O SOC é geralmente limitado a menos de 90% e a mais de 20%, com o objectivo de preservar a longevidade das baterias e por motivos de segurança. A diferença entre o máximo e o mínimo SOC é conhecido por *depth of discharge* (DOD), o qual varia de acordo com a tipologia do veículo e da bateria.

Como a operação dos PHEVs tem dois modos de funcionamento, a determinação da sua eficiência torna-se uma tarefa complicada. Considerando a distância em que o veículo transita do modo CD para CS, a curva de factor de utilização (*Utility Factor* (UF)) fornece o consumo do veículo no modo CD em relação ao modo CS.

$$Ctotal = C_{CD} * UF + C_{CS}(1 - UF) \quad (2.1)$$

UF = transição do modo CD para o modo CS

C_{CD} = consumo no modo CD

C_{CS} = consumo no modo CS

2.3.3.2 Vantagens/Desvantagens dos PHEVs

Os PHEVs apresentam-se como uma solução bastante promissora de deslocar grande parte do consumo de combustíveis dos veículos para a rede eléctrica. Podem ser recarregados durante as horas de vazio (noite), em que a energia é mais barata e pode ser proveniente de fontes renováveis não despacháveis, ou mesmo de centrais termoeléctricas ou ciclo combinado, que possuem rendimento muito superior ao do veículo convencional.

As vantagens que tornam os PHEVs[10] como os veículos da próxima geração são:

- Baixos custos de operação
- Redução da poluição do ar e do aquecimento global
- Redução da dependência de combustíveis fósseis
- Possibilidade de fornecimento de energia de emergência
- Aplicações V2G

Os principais problemas associados a este tipo de veículo são o custo adicional, o peso, o tamanho e a distribuição das baterias, assim como a disponibilidade de pontos de carregamento para carga do veículo. Existe também a necessidade de conceber uma estratégia de gestão de energia (*energy management* (EM)), de modo a optimizar o fluxo interno de energia do veículo. Torna-se por isso fulcral o desenvolvimento de técnicas de controlo avançadas para os sub-módulos do veículo, com o objectivo de alcançar maior robustez, estabilidade e eficiência do sistema global [5]. De realçar ainda, a diferença de arquitecturas usadas pela indústria automóvel na concepção de PHEVs. Enquanto a Toyota está a desenvolver uma versão PHEV do Prius de arquitectura paralela, a General Motors está a produzir um PHEV de arquitectura série - Chevy Volt.

A transição para os PHEVs, pode ser visto como um desafio e torna-se necessário o desenvolvimento de medidas favoráveis: criação de novas políticas e normas e ultrapassar certas barreiras económicas. Os PHEV complementam os hábitos de condução de grande parte da população – casa-trabalho-casa – e, para o caso da Europa, o percurso médio é 90%

[10] E, em geral, os veículos eléctricos.

das vezes inferior a 30 km em ambiente de cidade. Os veículos com distâncias diárias pequenas, podem nunca precisar de ir a uma estação de serviço.

2.3.4 Veículo a Pilha de Combustível (FCV)

Foi em 1839 quando se descobriu que se poderia gerar electricidade ao reverter a electrólise da água e, mais tarde, surgiu o termo de pilha de combustível. No entanto, e mais uma vez, o rápido desenvolvimento dos ICEs, suspenderam os projectos associados a esta tecnologia. Mais tarde, a NASA financiou inúmeras pesquisas referentes às pilhas de combustível, as quais foram usadas em diversas missões ao espaço[11] [2], [4], [5].

Os FCVs podem ser considerados como HEVs do tipo série, em que o hidrogénio é usado como fonte de energia para produzir electricidade, que pode ser usada na propulsão ou armazenada em baterias. O produto resultante do processo electroquímico, além de electricidade, é água. Estes veículos são portanto livres de emissões, não dependem dos combustíveis fósseis e são bastante eficientes. Não é por isso de estranhar que, nas últimas décadas, alguns fabricantes e algumas agências de governos tenham apoiado pesquisas no desenvolvimento desta tecnologia para o uso em veículos e noutras aplicações.

De modo a melhorar o arranque do veículo, dever-se-á usar com a pilha de combustível uma outra fonte de energia com alta densidade de potência, tal como baterias ou um supercondensador. Quando ligados à rede, para efeitos de V2G, os FCVs podem fornecer energia de emergência durante um apagão [2], [4], [5].

Contudo, a dificuldade de produção e armazenamento de hidrogénio e as limitações técnicas associadas às pilhas de combustível, são os maiores desafios a serem ultrapassados para tornar os FCVs disponíveis ao público. Apesar de existirem vários métodos de armazenamento de hidrogénio, tendo em conta a instalação, segurança e custo do veículo, o suposto armazenamento vai ser efectuado em alta pressão. Os FCVs não são actualmente uma solução a curto prazo, mas apresentam potencial. Outros problemas associados a estes veículos, resultam da extracção de hidrogénio. O hidrogénio não é uma fonte de energia, mas sim um elemento que transporta energia. É obtido a partir do gás natural com custos mais baixos ou pode ser obtido a partir da electrólise da água usando a energia fornecida pela rede, originando assim um conjunto de emissões associadas à sua produção. Não faz sentido usar gás natural para gerar electricidade e produzir hidrogénio em vez de usar directamente o gás natural [11].

[11] Nuclear – demasiado perigoso; Solar – demasiado volumoso; Baterias – demasiado pesadas.

2.4 Fontes de Energia

Como já foi referido, as fontes de energia são o principal obstáculo à comercialização dos veículos eléctricos. Como no sistema de transportes rodoviário o veículo convencional não está ligado a uma fonte de energia exterior, como é o caso dos comboios eléctricos, torna-se necessário o transporte desta e em quantidade suficiente por parte do veículo. É por esta razão, que na escolha da fonte de energia para um veículo é necessário ter em conta a sua densidade de energia (Wh/kg) e de potência (W/kg), de modo a ter autonomia e aceleração suficiente, respectivamente. Existem, no entanto, outro tipo de características desejadas tais como: rápido carregamento, descarregamento completo, baixo custo, ciclo de vida elevado, taxa de auto-descarregamento e de carregamento de alta eficiência, seguras, livre de manutenção, amigas do ambiente e recicláveis.

Na Figura 2.9 é representado um mapa de densidade de energia e de potência de várias fontes de energia.

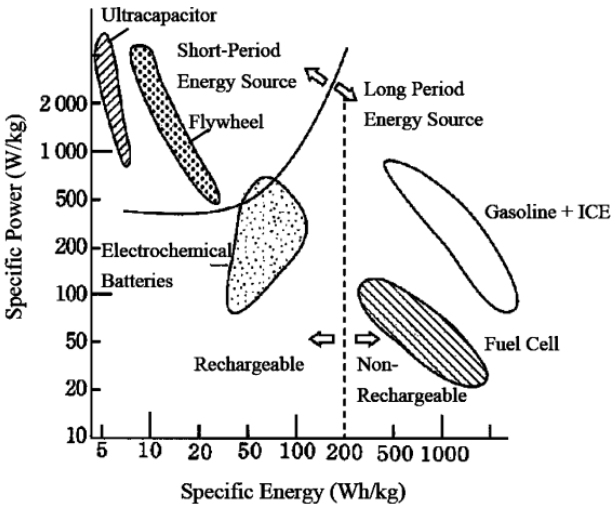


Figura 2.9 – Características de várias fontes de energia (escala logarítmica) [5].

O uso de múltiplas fontes de energia permite eliminar o compromisso entre a densidade de energia e de potência, resultando na escolha de fontes de energia em extremos opostos do gráfico apresentado (elevado valor de energia específica e de potência específica). No caso do HEV, a gasolina é uma fonte de elevada energia específica com o objectivo de aumentar a autonomia do veículo e a bateria é uma fonte recarregável com o objectivo de ajudar nas acelerações, reduzir as emissões e usada na travagem regenerativa. Normalmente, nos sistemas com baterias e supercondensadores, o funcionamento é realizado à base das baterias e, os picos gerados durante as cargas e descargas das baterias são suprimidos pelos

supercondensadores, resultando em menor potência fornecida por estas, aumentando assim a eficiência [4], [6].

Existem opiniões de que a densidade de energia e potência das actuais baterias e dos condensadores são suficientes para conceber veículo eléctricos atractivos. Por outro lado, os críticos afirmam que ainda é cedo. Outros problemas associados a estas fontes de energia são o ciclo de vida e o custo [5].

2.4.1 Baterias

As tecnologias principais de baterias usadas actualmente na indústria automóvel reduzem-se a dois tipos: hidreto metálico de níquel (NiMH) e iões de lítio (Li-Ion), Figura 2.10.

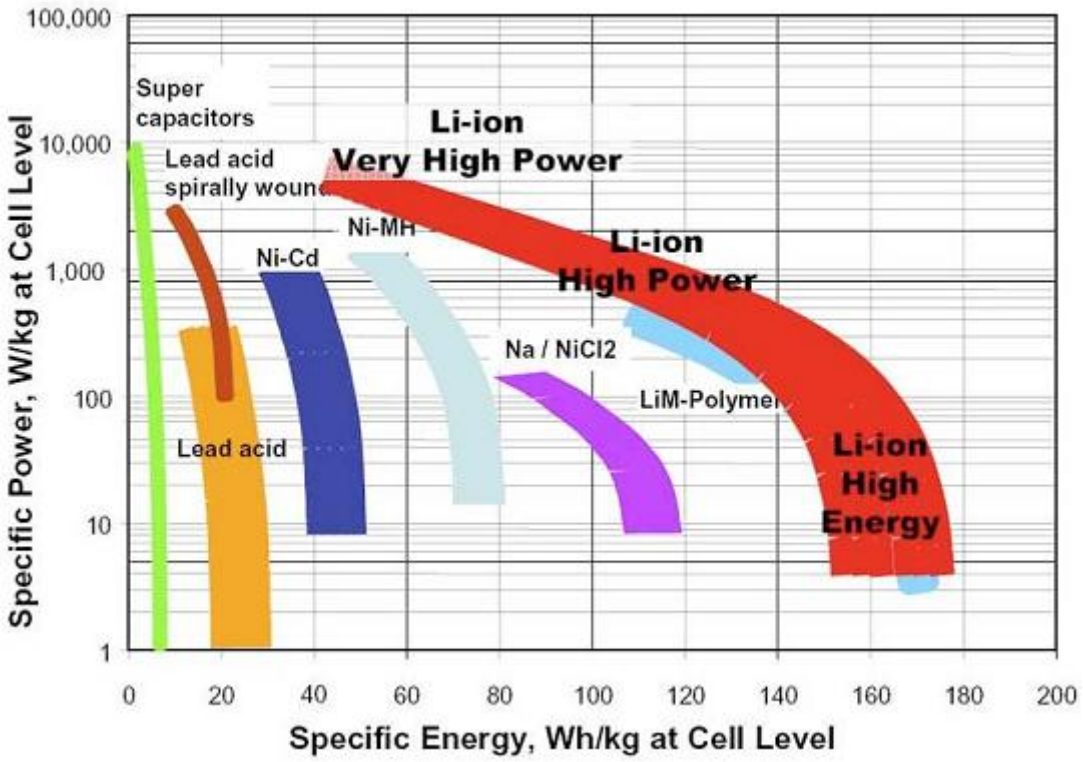


Figura 2.10 – Características de várias tecnologias de baterias [3].

As baterias NiMH são usadas na maioria dos HEVs vendidos nos EUA. Os pontos fortes destas baterias são a longevidade, o ciclo de vida e a segurança. Os pontos fracos resumem-se em limitações na densidade de potência e energia e baixas perspectivas de redução de custo.

Por outro lado, a tecnologia Li-Ion apresenta o potencial de corresponder aos requisitos de uma grande variedade de veículos eléctricos. Apresentam maior densidade de potência e

energia e potencial para um custo[12] inferior que as NiMH, mas requerem um maior controlo de tensão e temperatura das células. Actualmente, as atenções no desenvolvimento de baterias para a indústria automóvel estão viradas para a tecnologia Li-Ion. O desenvolvimento destas baterias dá-se em múltiplas direcções conforme o material usado na sua construção [10].

Na Figura 2.11 são indicadas as características das baterias para diferentes tipos de veículos eléctricos.

	HEV	BEV	PHEV (all)	PHEV-20	PHEV-30	PHEV-40	PHEV-60
AER (miles)	0	150-200	10-60	20	30	40	60
Material	NiMH	Li-ion	Li-ion	Li-ion	Li-ion	Li-ion	Li-ion
Total capacity (kWh)	1.3	30-60	4-30	4-8	8-12	12-16	20-30

Figura 2.11 – Caracterização das baterias típicas para os diferentes veículos eléctricos [12].

	Units	USABC[1]		MIT[2]	EPRI[3]	
Vehicle Assumptions						
CD Range	Miles	10	40	30	20	60
CD Operation	-	All-electric	All-electric	Blended	All-electric	All-electric
Electricity Use[4]	kWh/mile	0.42	0.30	0.19	0.24	0.24
Depth of Discharge	Percent	70%	70%	70%	80%	80%
Drive Cycle	-	UDDS	UDDS	UDDS, HFWET, US06	UDDS, HFWET	UDDS, HFWET
Body Type	-	Cross. SUV	Mid. Car	Mid. Car	Mid. Car	Mid. Car
Battery Mass, Total (Cells Only)[5]	kg	60 (45)	120 (90)	60 (45)	159 (121)	302 (252)
Total Vehicle Mass	kg	1950	1600	1350	1664	1782
Battery "Goals"						
Peak Power	kW	50	46	44	54	99
Peak Power Density	W/kg	830	380	730	340	330
***Total* Energy Capacity**	kWh	6	17	8	6	18
***Total* Energy Density**	Wh/kg	100	140	130	40	60
Calendar Life	years	15	15	15	10	10
CD Cycle Life	cycles	5,000	5,000	2,500	2,400	1,400
CS Cycle Life	cycles	300,000	300,000	175,000	< 200,000	< 200,000

Figura 2.12 – Exemplos de PHEVs e metas para baterias (a longo prazo) [10].

No entanto, o desenvolvimento de baterias Li-Ion está limitado a trocas de entre as seguintes categorias: densidade de potência e de energia, durabilidade, segurança e custo. Por exemplo, o aumento da densidade de potência requer maior tensão que reduz a longevidade e segurança e aumenta o custo. O aumento da densidade de energia tende a reduzir a densidade de potência. Ao optimizar a densidade de potência e energia, longevidade e

[12] Existem também opiniões contrárias em relação à queda do preço das baterias de Li-Ion com a produção em massa.

segurança irá aumentar o custo da bateria. De referir ainda a importância da tipologia, do desempenho e do perfil de uso do veículo eléctrico na definição de metas tecnológicas das baterias [10]. Na Figura 2.12 são indicadas metas, a longo prazo, de baterias para PHEVs estabelecidas pela USABC (*U.S. Advanced Battery Consortium*), MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) e EPRI (*Electric Power Research Institute*). Existem grandes ambições das diferentes entidades, quer nas características energéticas, como também associadas ao ciclo de vida da bateria.

2.4.2 Supercondensadores

A utilização de supercondensadores como armazenamento de energia esteve sempre muito condicionada, devido às limitações existentes na densidade de energia e na gama de capacidades que lhes é característica. Com os desenvolvimentos tecnológicos surgiram condensadores electroquímicos (ou de dupla-camada), que conseguem aliar o pouco volume com densidades de energia e capacidades bastante mais elevadas que os condensadores usuais [13].

Actualmente, os supercondensadores podem carregar-se e descarregar-se quase indefinidamente[13], têm um tempo de vida útil muito longo, permitem correntes de descarga elevadas, os tempos de carga e de descarga são semelhantes e bastante curtos (30 segundos aproximadamente), são fabricados com materiais não tóxicos, relativamente baratos e apresentam um rendimento bastante elevado. São utilizados nos veículos de propulsão eléctrica, como fonte de armazenamento de energia auxiliar ou como *buffers* de energia eléctrica ao absorverem os picos de carga existentes no sistema e, como resultado, alongam o tempo de vida das baterias, devido à menor utilização destas [6].

2.4.3 Pilha de Combustível

Ao contrário das baterias, a pilha de combustível é um aparelho electroquímico que gera continuamente energia, em vez de a armazenar, enquanto lhe for fornecido hidrogénio. A eficiência da conversão, o funcionamento sem ruído, as emissões praticamente nulas, o rápido reabastecimento e a durabilidade, são algumas das vantagens deste tipo de tecnologia. O hidrogénio parece ser o combustível não poluente ideal, pois apresenta grande densidade de energia e o produto da reacção da pilha de combustível é apenas água [4].

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O \qquad (2.2)$$

[13] Em comparação com as baterias.

De acordo com a Figura 2.9, a energia específica da pilha de combustível é equivalente à da gasolina, contudo, a sua potência específica é bastante menor, concluindo-se que o desempenho do arranque de um veículo com pilha de combustível seria inferior em comparação com o do veículo convencional. A integração da bateria ou supercondensador com a pilha de combustível podem melhorar o desempenho do arranque do veículo, tornando a realçar que, com múltiplas fontes de energia criteriosamente seleccionadas, o desempenho dos veículos pode ser bastante melhorado [5].

Este tipo de tecnologia é visto como uma solução a longo prazo, mas encontra-se ainda numa fase prematura, principalmente devido a todos os problemas associados ao manuseamento do hidrogénio.

2.5 Dinâmica do Veículo

Procede-se agora à análise dinâmica do veículo quando este está em movimento, com o objectivo de determinar as variáveis que mais influenciam o seu consumo energético. Existem inúmeras expressões relativas aos pneus, aos amortecedores e à trajectória do veículo, no entanto, considera-se o veículo a circular num só sentido de modo a simplificar a análise pretendida.

Na Figura 2.13 estão representados os sentidos e os pontos de aplicação das forças aplicadas no veículo. O movimento do veículo é descrito pela velocidade do seu centro de massa (CM) e a sua localização é determinada pela sua massa e como esta está distribuída pela estrutura do veículo [14], [15].

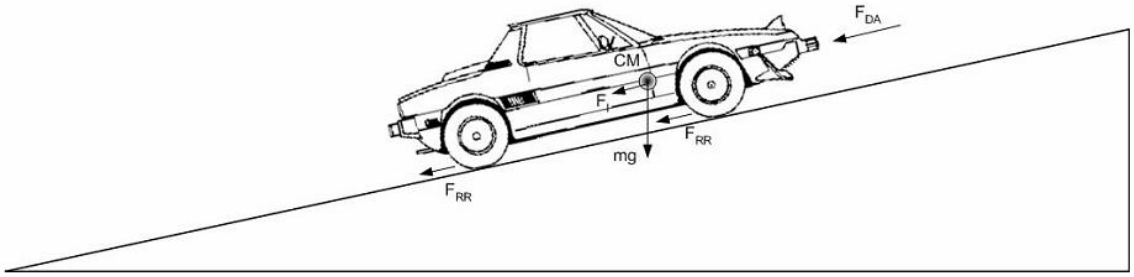


Figura 2.13 – Forças aplicadas ao veículo [14].

O veículo está sujeito a forças resistentes que se opõem ao seu movimento, nomeadamente a força de resistência ao rolamento dos pneus no contacto pneu-estrada, $\mathbf{F_{RR}}$, força de resistência aerodinâmica (devido ao vento frontal), $\mathbf{F_{DA}}$, e a força da gravidade, devido à inclinação da estrada, $\mathbf{F_l}$.

A força total resistente é a soma de todas as forças que actuam no veículo:

$$F_R = F_{RR} + F_{DA} + F_I \tag{2.3}$$

A força total de resistência ao rolamento dos pneus, **F_{RR}**, é devida aos seguintes factores e depende das quatro rodas do veículo. Se estiverem todas no mesmo piso, **F_{RR}** é dado pela seguinte equação [15].

1. Perda de energia devido à deflexão lateral do pneu perto da área de contacto
2. Perda de energia devido à deflexão dos elementos de passo do pneu
3. Ao atrito na superfície de contacto pneu-estrada
4. Ao escorregamento do pneu nas direcções longitudinal e lateral
5. Deflexão da superfície da estrada
6. Ao arrastar do ar no interior e exterior da roda
7. Energia perdida nas lombas ou irregularidades do piso da estrada

$$F_{RR} = f_r mg \tag{2.4}$$

F_{RR} = força total de resistência ao rolamento dos pneus [N]

f_r = coeficiente de atrito ao rolamento nos pneus

m = massa do veículo [kg]

g = aceleração da gravidade [m/s^2]

Em que f_r toma os seguintes valores para vários pisos.

Tabela 2.1 – Valor de f_r para diferentes tipos de piso.

Tipo de piso	f_r
Cimento	0,008 – 0,01
Asfalto	0,01 – 0,015
Calçada	0,033 – 0,055
Areia	0,15 – 0,3
Neve	0,025 – 0,037

A força de resistência aerodinâmica, **F_{DA}**, é dada pela seguinte equação e resulta da interacção entre o ar e o veículo:

- Fluxo de ar sobre o exterior (carroçaria) da estrutura do veículo, devido à fricção do ar na superfície deste e ao modo como essa fricção altera a corrente de ar na parte traseira do veículo.
- Fluxo de ar através do radiador do motor, no interior das cavas e das rodas e no interior do veículo, com a finalidade de refrigerar e de ventilar o habitáculo.

$$F_{DA} = \frac{1}{2}\rho C_D A_f V_v^2 \quad (2.5)$$

ρ = densidade do ar [kg/m^3]

C_D = coeficiente de resistência aerodinâmico

A_f = área frontal do veículo [m^2]

V_v = velocidade do veículo em relação ao vento [m/s]

A densidade do ar por sua vez é dada por:

$$\rho = 1.225\left(\frac{P_r}{101{,}325}\right)\left(\frac{288{,}16}{273{,}16 + T_r}\right) \quad (2.6)$$

P_r = pressão atmosférica em [kPa]

T_r = temperatura do ar [ºC]

A área frontal em veículos ligeiros pode ser estimada, de acordo com [15], através da sua massa, na escala de 800 kg – 2000 kg, por:

$$A_f = 1.6 + 0.00056(m - 765) \quad (2.7)$$

Um ponto importante na concepção de um veículo é o estudo aerodinâmico deste em túneis de vento. É necessário que o atrito entre o veículo com o ar seja minimizado para que possa atingir maiores velocidades com um menor consumo de combustível. O coeficiente de resistência aerodinâmico, C_D, pode ser obtido por teste em túnel de vento com modelos à escala ou com veículos reais.

Considerando o ângulo θ entre a superfície e o plano, a força da gravidade devido à inclinação da estrada, $\mathbf{F_I}$, é dada por:

$$F_I = mgsen\theta \quad (2.8)$$

Chega-se assim a:

$$F_R = f_r mg + \frac{1}{2}\rho C_D A_f V_v^2 + mgsen\theta \quad (2.9)$$

A força resultante no veículo vai ser:

$$\sum F = F_V - F_R = m \cdot a \quad (2.10)$$

F_V = força desenvolvida pelo veículo [N]

F_R = força total resistente [N]

m = massa do veículo [kg]

a = aceleração do veículo [m/s^2]

A força desenvolvida pelo veículo é então:

$$F_V = F_R + m \cdot a \tag{2.11}$$

De acordo com [15] e como se pode verificar na Figura 2.14, a baixa velocidade e com piso duro, a resistência ao enrolamento, $\mathbf{F_{RR}}$, é a principal oposição ao movimento do veículo, o que não acontece para altas velocidades, sendo neste caso a força de resistência aerodinâmica, $\mathbf{F_{DA}}$. Quanto à força da gravidade, devido à inclinação da estrada, esta não depende nem da velocidade do veículo nem do tipo de piso, apenas do ângulo de inclinação da estrada θ e vai ser resistente ao movimento do veículo numa subida e a favor numa descida. A redução do peso do veículo, da resistência ao rolamento dos pneus e da resistência aerodinâmica podem contribuir para o aumento da eficiência energética dos veículos.

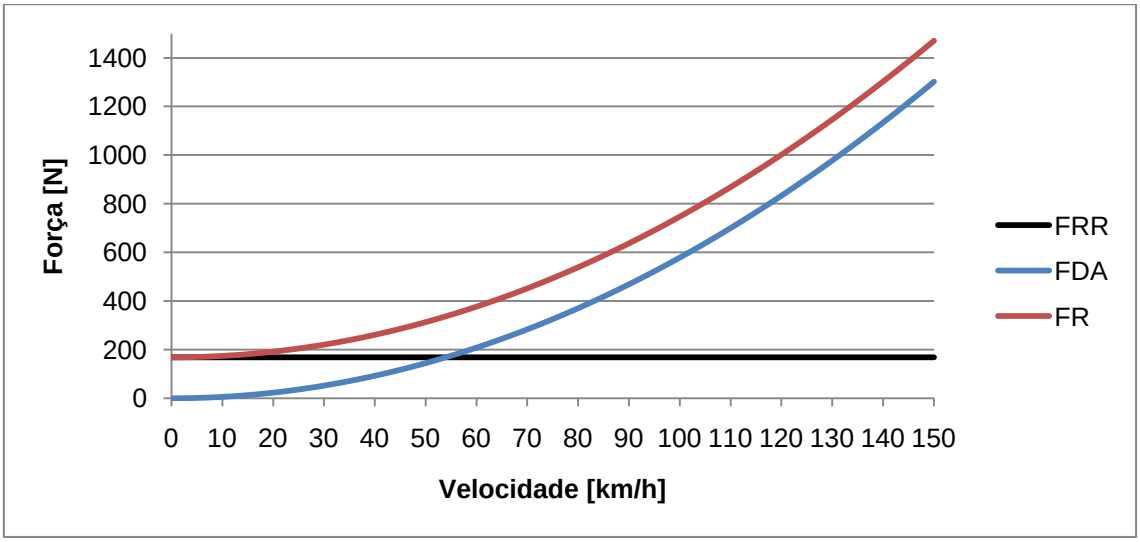


Figura 2.14 – Variação da força de resistência ao rolamento, F_{RR}, da força de resistência aerodinâmica, F_{DA}, e da força resistente total, F_R, com a velocidade. Foram usados os dados da Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Valores considerados para um veículo típico.

Dado	Valor
m	1375 kg
A_f	2,5 m^2
C_D	0,4
f_r	0,0125
θ	0º
g	9,8 m/s^2
ρ	1,2 kg/m^3

3 Mobilidade Eléctrica em Portugal

3.1 Decreto-Lei n.º 39/2010

O Decreto-Lei n.º 39/2010 de 26 de Abril define o Programa para a Mobilidade Eléctrica (MOBI.E) e visa três objectivos centrais:

- Incentivar a aquisição e utilização de veículos eléctricos. É regulado um subsídio de 5000€[14] à aquisição, por particulares, de veículos automóveis eléctricos, que poderá ascender a 6500€, no caso de haver simultaneamente abate de veículo automóvel de combustão interna. Isenção do imposto sobre veículos e do imposto único sobre circulação.
- Garantir que o carregamento de baterias de veículos eléctricos se realiza através de uma rede integrada de carregamento, de forma cómoda e eficaz. Para esse efeito, será criada uma rede nacional de pontos de carregamento que permitirá qualquer pessoa carregar as baterias do seu veículo em qualquer ponto de carregamento disponível no País, mediante a utilização de um cartão de carregamento contratado com qualquer comercializador de electricidade para a mobilidade eléctrica. Facilita-se ainda a criação de pontos próprios de carregamento a instalar nas residências e edifícios. A rede piloto para a mobilidade eléctrica abrange 25 cidades e prevê-se que até Julho de 2011 sejam instalados 1350 pontos de carregamento, dos quais 50 serão postos de carregamento rápido. Os 25 municípios e o centro de inteligência em inovação – INTELI – criaram um *living lab* para a mobilidade eléctrica, Figura 3.1, o qual se encontra integrado no RENER – *Renewable Energy Living Lab*, que, por sua vez, integra a Rede Europeia de *Living Labs*.

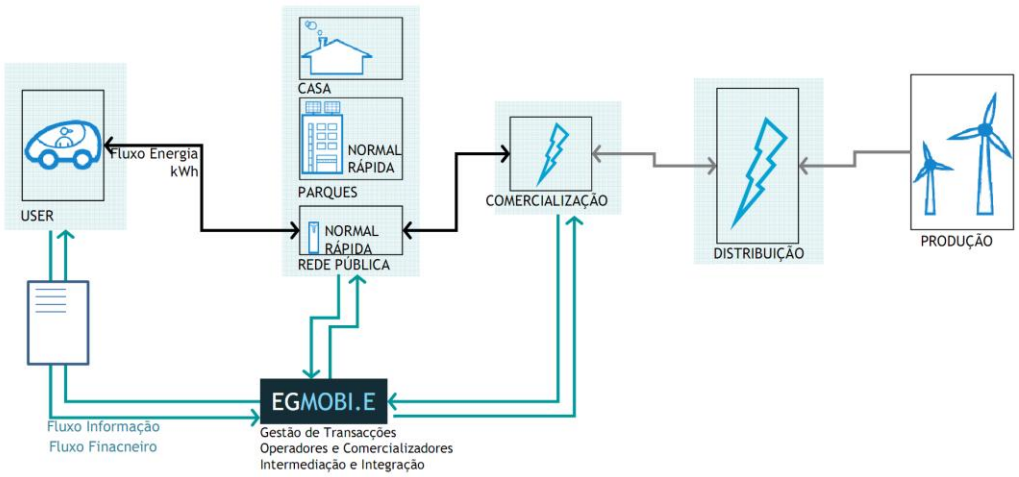


Figura 3.1 – Diagrama da rede de mobilidade eléctrica em Portugal [39].

[14] Atribuído aos primeiros 5.000 veículos automóveis ligeiros eléctricos novos matriculados em Portugal (subsídio total de 25M€).

- Consagrar um regime de universalidade e equidade no acesso aos serviços de mobilidade eléctrica. Permitir o acesso a qualquer ponto de carregamento independentemente do comercializador de mobilidade eléctrica contratado e existência de condições técnicas de interoperabilidade entre essa rede e as diversas marcas e sistemas de carregamento.

Salientam-se ainda vários pontos de interesse:

- Obrigação de instalar pontos de carregamento de acesso privativo em edifícios novos.
- Adopção de regras que viabilizam a instalação de pontos de carregamento de acesso privativo em edifícios existentes.
- A comercialização de electricidade para a mobilidade eléctrica corresponde à compra de grosso e venda a retalho de energia eléctrica para fornecimento aos utilizadores de veículos eléctricos.
- São de **carregamento normal** os pontos que possuam uma potência inferior a 40 kVA, em caso de fornecimento em corrente alterna, ou inferior a 40 kW, em caso de fornecimento em corrente contínua.
- São de **carregamento rápido** os pontos que possuam uma potência igual ou superior a 40 kVA, em caso de fornecimento em corrente alterna, ou igual ou superior a 40 kW, em caso de fornecimento em corrente contínua.

Para mais informações sobre o Programa da Mobilidade Eléctrica consultar o Decreto-Lei referido ou o site da MOBI.E [17].

3.2 Método de Previsão

Para estimar o impacto dos veículos eléctricos no SEN e respectivas emissões é necessário prever o número de veículos eléctricos vendidos e em circulação em Portugal. Pretende-se, portanto, caracterizar o parque automóvel nacional através de previsão de vendas, nos próximos anos. Existe, no entanto, grande incerteza no mercado automóvel, como resultado de inúmeros factores que o influenciam. De modo a prever a tendência de vendas de veículos, normalmente são realizadas extrapolações das tendências existentes, construídos modelos de multi-variáveis, definidas funções e cenários dinâmicos da frota, ou uma combinação destes métodos. Para este trabalho pretende-se apenas realizar uma simples estimativa de venda de veículos nos próximos anos, dos quais uma percentagem será de

veículos eléctricos. Considera-se, para esse efeito, uma certa taxa de crescimento anual, que será posteriormente determinada [18]:

$$M_t = M_{t-1}(1 + g) \tag{3.1}$$

M_t = venda de veículos no ano t

g = taxa de crescimento de vendas anual

Pretende-se agora estimar a percentagem de vendas anuais que corresponde a veículos eléctricos. A difusão de novas tecnologias geralmente é representada por uma curva em S, Figura 3.2, e é dotada de um pequeno crescimento inicial, Fase 1, seguido de um crescimento mais acentuado, Fase 2, chegando depois à zona de saturação, Fase 3. O nível de penetração de veículos eléctricos depende de inúmeros factores, entre eles, destaque para a legislação, economia, baterias e acessibilidade e disponibilidade de pontos de carregamento. Elaborar uma previsão deste tipo revela-se como uma tarefa bastante complicada. Neste trabalho são definidos três cenários que estão interligados entre si. O cenário base, que serve de suporte aos outros cenários, e o cenário optimista e pessimista, que são baseados em possíveis tendências futuras. É usada uma função logística de difusão padrão, obtendo-se assim os cenários de penetração [18], [19].

$$P_t = \frac{1}{1 + e^{-(\alpha+\beta\cdot\Delta t)}} \tag{3.2}$$

P_t = venda percentual anual

α = posiciona a curva de acordo com a penetração inicial

β = taxa de crescimento

Δt = ano: 0, 1, 2, 3, 4…

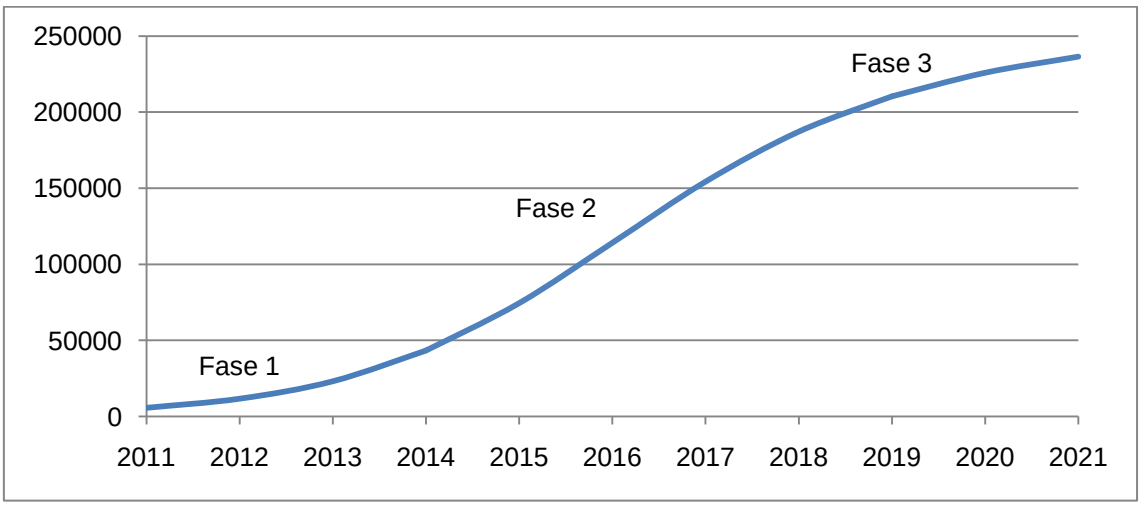


Figura 3.2 – Exemplo de curva em S de difusão de novas tecnologias.

A venda anual de veículos eléctricos é então dada por:

$$N_t = M_t \cdot P_t \tag{3.3}$$

3.3 Estatísticas do Parque Automóvel Nacional

De modo a determinar a venda de veículos eléctricos em Portugal, é necessário estimar os parâmetros em falta nas equações anteriores. Existe uma diversidade de dados relacionados com a indústria automóvel disponíveis para acesso público no portal da ACAP (Associação Automóvel de Portugal) na secção Data Center/Auto Informa [20]. Os dados considerados relevantes para o presente estudo são indicados nas seguintes figuras[15].

Como se pode constatar da Figura 3.3, o parque automóvel está em constante crescimento apesar da diminuição de vendas registadas nos últimos anos, Figura 3.4, como resultado da crise económica europeia e mundial. Num país com cerca de 10 milhões de habitantes, nos últimos 20 anos o parque automóvel em Portugal aumentou em cerca de 3 milhões de veículos, cifrando-se em 2009 em quase 4,5 milhões.

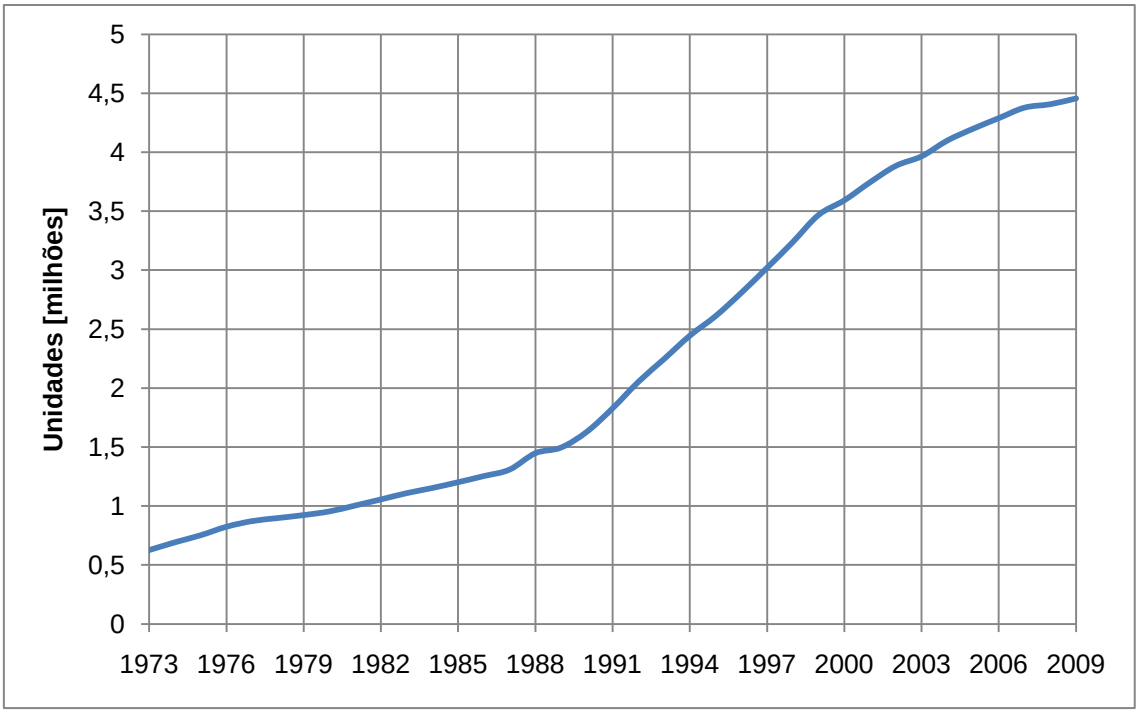


Figura 3.3 – Parque automóvel em Portugal [20].

[15] Os dados usados são referentes aos veículos ligeiros de passageiros com inclusão dos veículos Todo-o-Terreno.

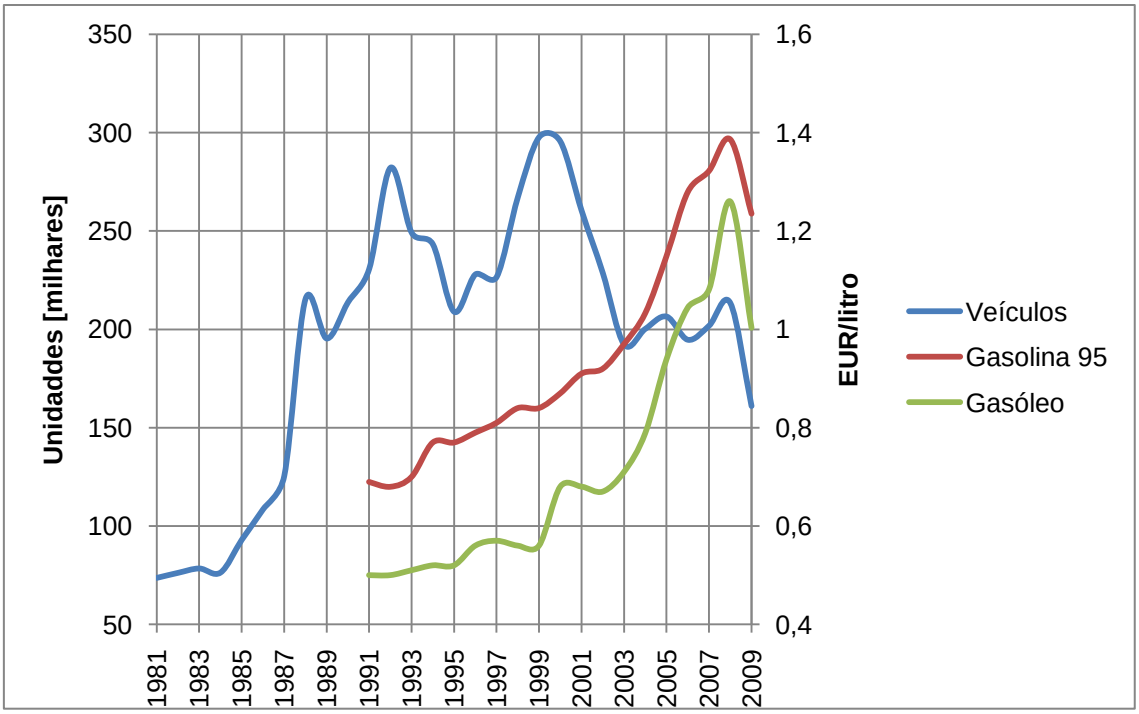


Figura 3.4 – Venda de veículos em Portugal e preço médio de venda ao público de combustíveis [20], [21].

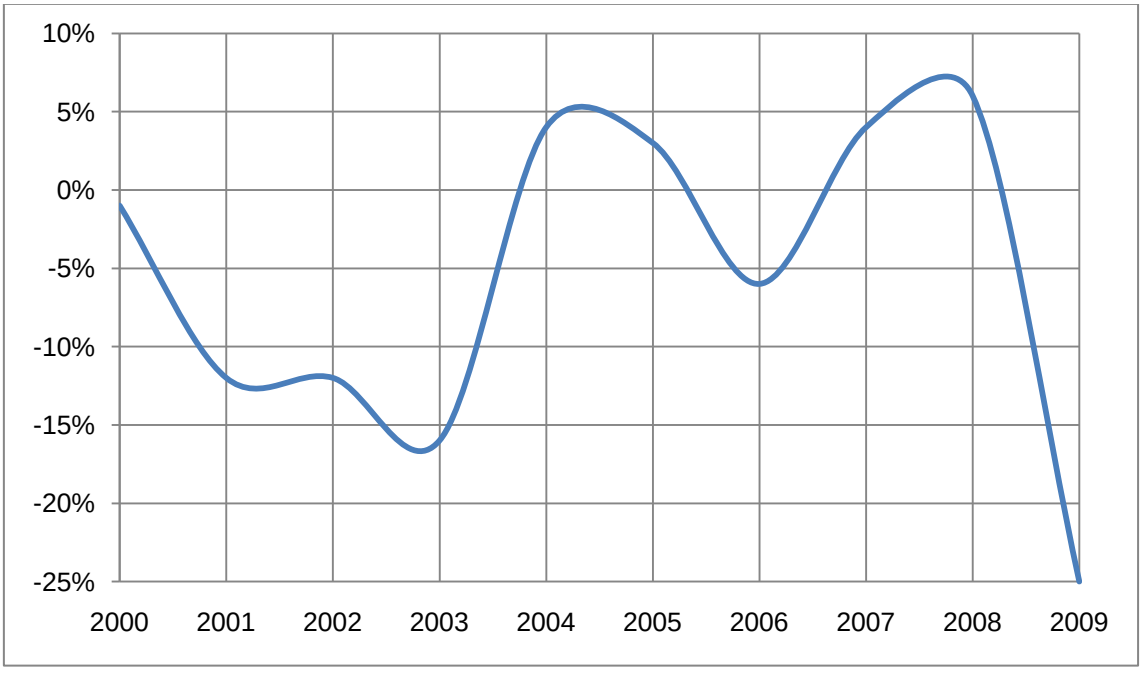


Figura 3.5 – Variação da venda de veículos nos últimos anos [20].

Na Figura 3.4 são indicados os veículos vendidos e o preço médio anual dos combustíveis. O aumento do preço dos combustíveis e a crise económica são os principais responsáveis na quebra de vendas. Segundo os dados disponíveis, observa-se que a venda

média anual situa-se nas 195 mil unidades e que este valor está de acordo com as vendas registadas nos últimos anos. Na Figura 3.5 é indicada a variação anual de venda de veículos desde 2000. Um crescimento médio anual de vendas de 4,1% é obtido se forem considerados os dados desde 1981. No entanto, as actuais condições do mercado automóvel são bastante diferentes das que existiam à 30, 20 e 10 anos e, por isso, para efeitos de previsão, consideram-se os dados dos últimos anos, depois da estabilização do mercado, ou seja, a partir de 2004. Em 2009, as vendas tiveram uma quebra de 25%. Na determinação da taxa de crescimento anual de vendas, se esse ano for contabilizado, o valor situa-se em -2%, caso contrário, é 2%.

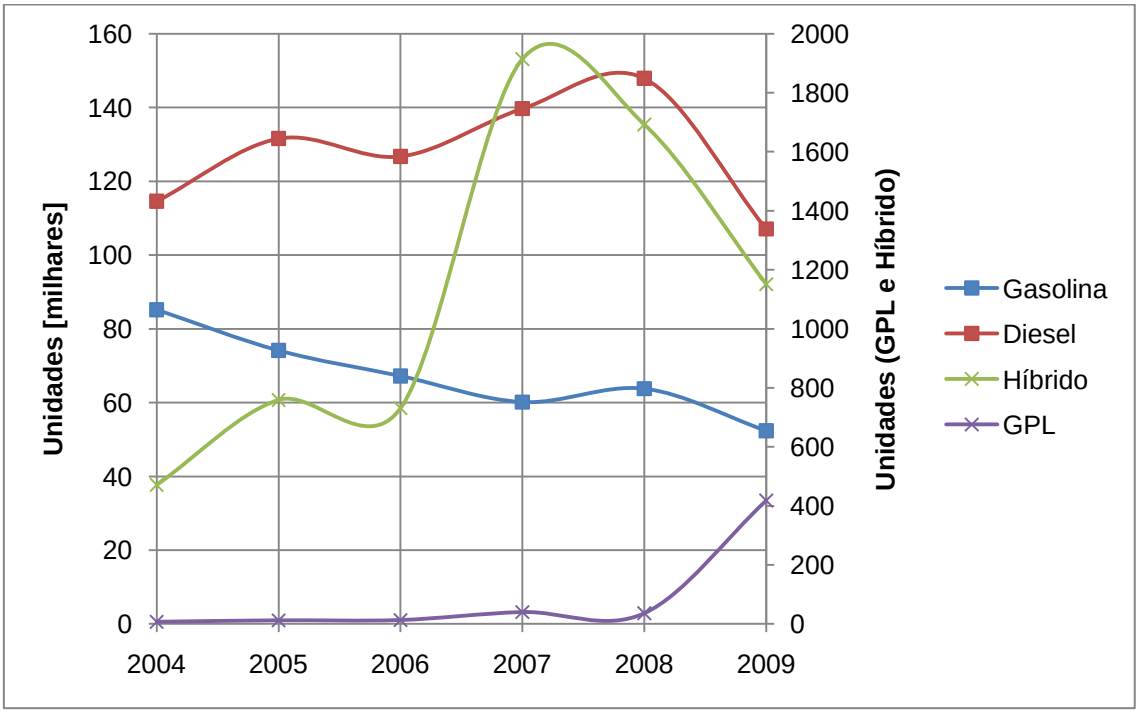


Figura 3.6 – Venda de veículos por tipo de combustível [20].

Tabela 3.1 – Venda de HEVs em Portugal [20].

Ano	Unidades	Variação
2004	471	-
2005	759	61%
2006	731	-4%
2007	1914	162%
2008	1692	-12%
2009	1151	-32%

Nos últimos três anos, o grosso das vendas em território nacional é de veículos a diesel, Figura 3.6, que corresponde a cerca de 69% das vendas totais. Se não for considerado o ano de 2009, observa-se que a evolução nas vendas de veículos a diesel e a gasolina dá-se em sentidos opostos. Quanto aos HEVs, Tabela 3.1, não tiveram o mesmo impacto que tiveram nos EUA e no Japão. As vendas são bastante baixas e com a concorrência dos veículos a diesel, torna-se difícil aumentar a penetração no mercado nacional, tal como acontece na Europa. A venda de veículos a GPL[16], em 2009, aumentou cerca de 1160% face a 2008. A justificação para o sucedido deve-se aos sucessivos aumentos no preço dos combustíveis, tornando-se o GPL uma alternativa mais económica. De referir ainda, que segundo os dados da ACAP, a venda de veículos puramente eléctricos foi nula.

Na Figura 3.7 são comparadas as vendas mensais em 2008, 2009 e 2010. Em 2009 foram vendidos apenas 161 mil veículos. A crise económica e a elevada fiscalidade automóvel são os grandes responsáveis pela forte contracção do mercado automóvel. A situação poderia ter sido mais gravosa se não existisse o programa de incentivos ao abate de veículos em fim de vida proposto pelo Governo. Como resultado, o parque automóvel em Portugal vai envelhecendo. Dos dados disponibilizados (provisórios), referentes a 2010, verifica-se que o mercado está a recuperar face a 2009 e as vendas aparentam ter o mesmo perfil de 2008.

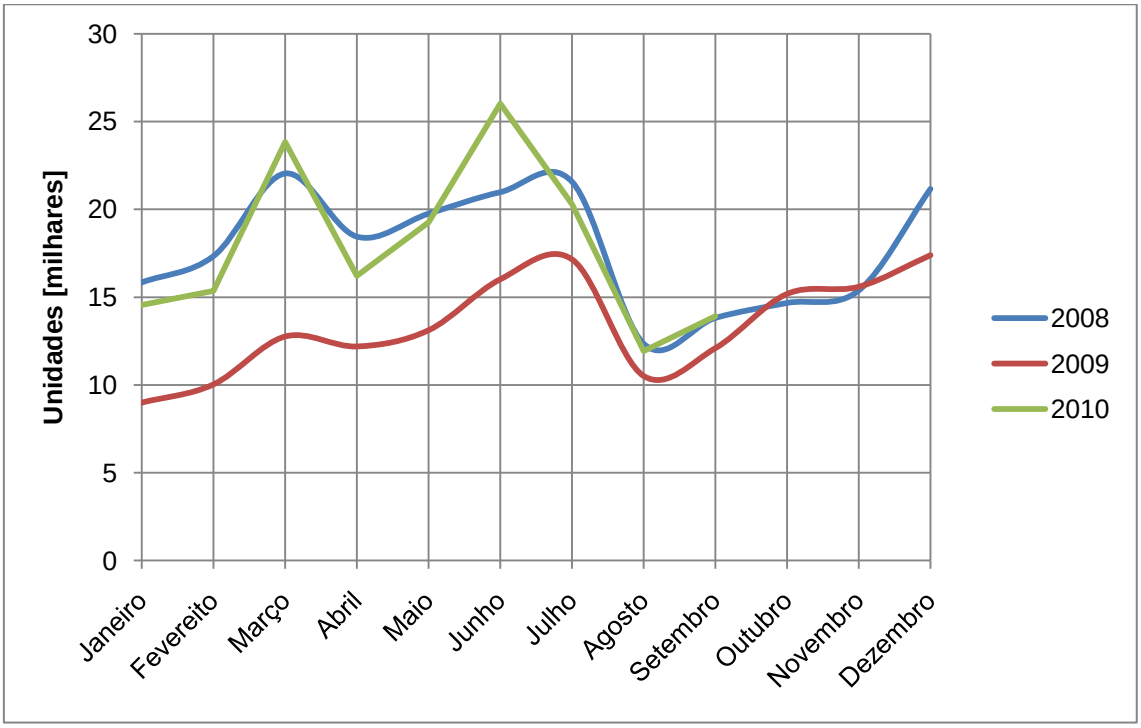


Figura 3.7 – Venda mensal de veículos em Portugal nos últimos anos [20].

[16] Gasolina/GPL e GPL.

Relativamente à idade dos veículos em 2009, Figura 3.8, o veículo ligeiro de passageiros em Portugal apresenta uma idade média de 10,4 anos, isto porque cerca de 48% do parque automóvel tem idade superior a 10 anos [20]. Os condutores destes veículos revelam-se como público-alvo do marketing dos veículos eléctricos. É necessário informar a população em relação à nova tecnologia de mobilidade eléctrica, sobre os incentivos e sobre a rede de pontos de carregamento, mas também, das suas limitações. A integração destes veículos nas estradas portuguesas representa um desafio para o país, para a indústria automóvel e para o SEN.

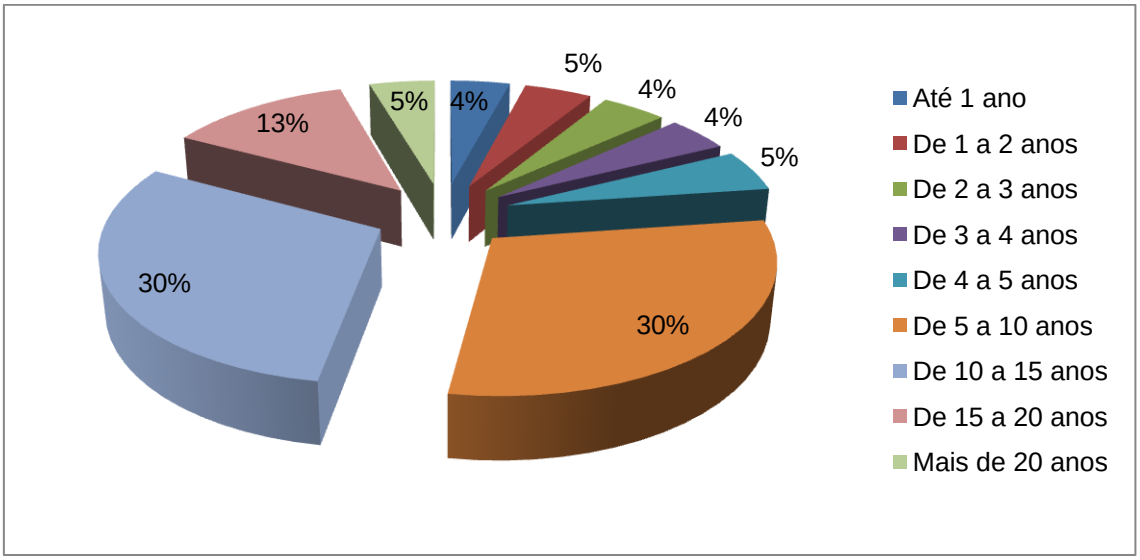


Figura 3.8 – Idade do parque automóvel em Portugal [20].

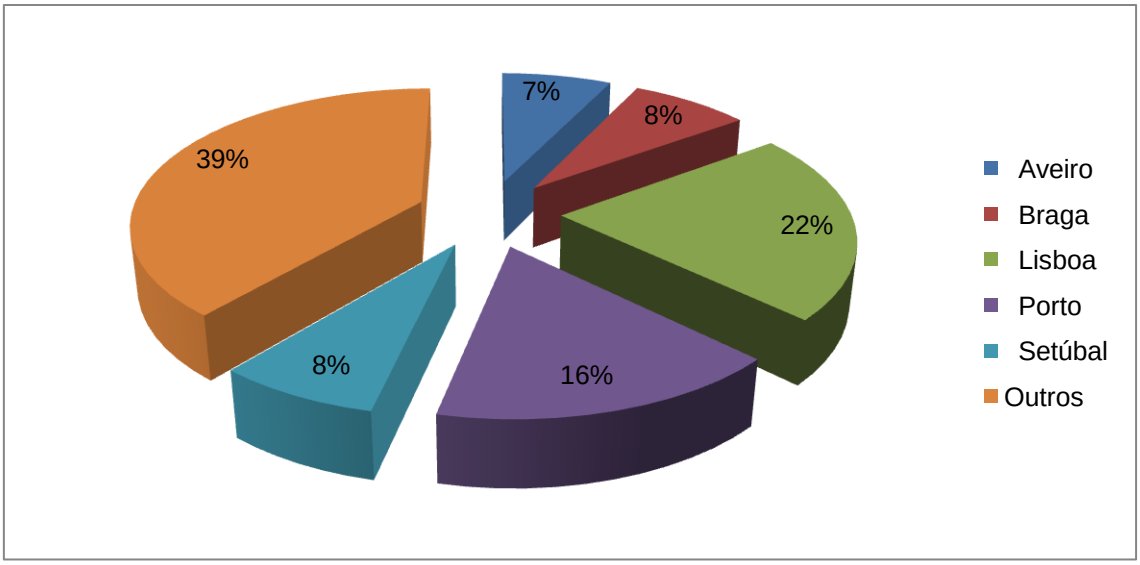


Figura 3.9 – Distribuição de veículos por região [20].

Em média no país existem 2,4 habitantes por veículo ligeiro, um valor um pouco acima da média da UE (União Europeia) de 2,1 [20]. Como seria de esperar, Lisboa e Porto são as cidades que possuem maior número de veículos em circulação. Actualmente é nestas zonas que existe maior número de pontos de carregamento, segundo [22], espera-se, por isso, que as primeiras vendas de veículos eléctricos ocorram principalmente nestas cidades.

3.4 Cenários de Penetração de Veículos Eléctricos em Portugal

3.4.1 Mercado

O lançamento de uma nova tecnologia é sempre considerado um desafio. Numa altura em que o mercado automóvel está em contracção, o lançamento da mobilidade eléctrica torna-se um enorme desafio para a indústria automóvel. Existem diversos factores a favor desta tecnologia, tais como o preço da electricidade, incentivos, redução de emissões e diminuição da poluição sonora. Por outro lado, o elevado preço e todos os problemas associados às baterias, podem constituir enormes barreiras à comercialização destes veículos. No entanto, da análise realizada no ponto anterior, os condutores estão preocupados com o aumento dos preços da gasolina e do diesel e suas futuras oscilações e procuram alternativas mais económicas a curto/médio prazo. Ultrapassados os problemas associados a estes veículos, não restam dúvidas que ficam criadas as condições para a sua comercialização em massa e, tal como a explosão de vendas de veículos GPL já registada, o mesmo poderá vir a acontecer em relação à nova geração de veículos eléctricos. É preciso assegurar, no entanto, que estes se revelem como uma alternativa viável e que as marcas automóveis ofereçam garantias adequadas do seu produto.

Actualmente, o mercado automóvel é constituído por várias marcas que oferecem inúmeros modelos de veículos de diversas gamas. Nos últimos anos foi registado um aumento de vendas nos veículos económicos, no entanto, os veículos de gama inferior e médio inferior são os mais vendidos em Portugal correspondendo a cerca de 70% das vendas, repartidas igualmente. Isto reflecte o baixo poder de compra da população em geral que, com baixo orçamento disponível, preferem optar por modelos mais baratos [20].

É já em 2011 que começa a ser comercializada a nova geração de veículos eléctricos. Tudo indica que sejam o Nissan Leaf e o Opel Ampera (versão europeia do Chevrolet Volt) as primeiras alternativas a chegar ao mercado nacional. Indicam-se, na Tabela 3.2, as características destes veículos. Apesar da diferença de arquitectura e funcionamento destes veículos, existe uma grande disputa entre estes dois modelos. A discussão centra-se nas baterias. A General Motors justificou o preço acrescido do Volt em comparação com o Leaf devido à Nissan ainda não ter anunciado a garantia das baterias, esperando que essa falta de informação originasse preocupações aos possíveis compradores, relativamente à confiança

das baterias da marca. Entretanto, a Nissan apresentou uma garantia igual à do Volt. Existem ainda muitas especulações acerca da qualidade das baterias do Leaf, a informação é escassa, a autonomia, por muitos, é considerada exagerada e muitos questionam o DOD usado. Resta apenas esperar o lançamento destes veículos no mercado e, com o passar dos anos, comprovar a qualidades das baterias de cada marca.

Tabela 3.2 – Especificações do Nissan Leaf e Opel Ampera [23], [24].

		Nissan Leaf	Opel Ampera
Tipo		EV	PHEV Série
Motor Eléctrico	**Tipo**	AC Síncrono	AC Síncrono
	Potência	80 kW	111 kW
	Binário	280 Nm	370 Nm
Gerador		-	55 kW
ICE	**ICE**	-	Gasolina 1.4 litros
	Potência	-	82 cv[17]
Baterias	**Tipo**	Iões de Lítio	Iões de Lítio
	Potência	+90 kW	130 a 140 kW
	Energia	24 kWh	16 kWh
	DOD	80%	55%
	Garantia	8 anos ou 160.000 km	8 anos ou 160.000 km
Velocidade Máxima		+140 km/h	160 km/h
Autonomia		160 km[18]	60 km (CD)
Preço		35.250€	42.900€

De acordo com o Decreto-Lei n.º 39/2010, os PHEVs cumprem os requisitos na definição de veículo eléctrico. No entanto, vai depender da homologação europeia definir o estatuto destes veículos e, mediante essa decisão, o veículo poderá usufruir ou não do subsídio do governo. Existe já pressão das marcas produtoras deste tipo de veículos de forma a regularizar esta situação. Para este trabalho considera-se que os potenciais compradores de PHEVs têm direito ao subsídio.

Um problema dos EVs é claramente a autonomia, não é por isso de estranhar o seguinte aviso na página da Nissan: “Por favor, assegure-se que a distância da sua residência ao seu destino ou ponto de abastecimento corresponde à autonomia do LEAF”, [23]. Isto porque com este tipo de veículo é necessário “planear” as deslocações, em termos de distância a percorrer e verificar se o veículo possui autonomia suficiente. Caso contrário, se o SOC das baterias chegar a um certo valor mínimo, num lugar remoto, sem fácil acesso à rede eléctrica, o veículo terá que ser rebocado ou será necessário transportar baterias carregadas ao local para

[17] 1 kW = 1,34 cv (cavalos)
[18] Bateria carregada sem A/C; modo US LA4.

dar assistência ao veículo[19]. Estas situações trazem elevados custos e por isso são de evitar. A Nissan informou também que as baterias deverão ter entre 70 a 80% de capacidade após 10 anos e, que o uso da carga rápida, degrada a durabilidade destas.

Os PHEVs revelam-se como uma solução mais equilibrada tendo em conta o estado de arte das baterias. Possuem os dois tipos de propulsão que inflacionam o seu preço. O sucesso dos veículos a diesel em Portugal e no resto da Europa sugerem a instalação de um motor a diesel nos PHEVs ao invés do de gasolina. Como resultado, o preço destes veículos seria superior às versões a gasolina (tal como hoje acontece) em troca de um abastecimento mais barato à base de diesel (e electricidade).

3.4.2 Cenários Considerados

Prever o nível de penetração de veículos eléctricos no mercado nacional revela-se como uma tarefa bastante complicada. O preço de alguns veículos que em breve irão chegar ao mercado ainda não estão bem definidos, a rede de pontos de carregamento ainda não está totalmente implementada e operacional e a população não está devidamente informada. Todos estes factores são considerados ao estimar a venda anual de veículos eléctricos em Portugal. Para este trabalho é considerado um período de curto prazo[20] de nove anos, ou seja, desde o início de comercialização de veículos eléctricos, 2011, até 2020. Supõe-se que em 2020 a integração da mobilidade eléctrica no país ainda esteja em evolução, assim como as características dos veículos eléctricos. A barreira do preço só será ultrapassada com a massificação de produção dos componentes dos veículos eléctricos e, a da autonomia, com os avanços tecnológicos.

Na estimativa de vendas de veículos eléctricos são considerados dois tipos, os EVs e os PHEVs. Os EVs são actualmente ideais para deslocações curtas sendo os condutores em Portugal caracterizados por uma distância média diária de 35,6 km. Por outro lado, os PHEVs são usados para reduzir custos de abastecimento e para grandes deslocações - depois de usada toda a energia das baterias, passa a funcionar como um HEV aumentando assim a sua eficiência. Quer em 2011, quer em 2020, presume-se que as vendas de EVs irão ser significativamente superiores aos PHEVs, principalmente pela diferença de preço, e que a tendência de vendas de cada tipo de veículo se mantenha. É necessário conciliar o aumento da capacidade das baterias, o tempo de carregamento e as técnicas de carregamento rápido (não prejudiciais às baterias) para que essa situação se inverta, caso contrário, as pessoas que optarem por um PHEV em 2011, certamente também o irão fazer em 2020. Como já foi referido, a concepção de baterias funciona com trocas entre as suas características e os

[19] Troca de baterias ou possibilidade de uso da bateria até um ponto de carregamento.
[20] Do ponto de vista tecnológico.

avanços tecnológicos nessa área já permitem a criação de soluções interessantes, mas com limitações.

Procede-se agora à caracterização das vendas de veículos ligeiros de passageiros em Portugal, Figura 3.10. Para tal, são consideradas as estatísticas do parque automóvel nacional, nomeadamente a venda anual de 195 mil unidades e a taxa de crescimento de vendas anual de 1%. Na determinação do último parâmetro considerou-se que a já avançada idade média de cerca de 50% dos veículos em Portugal e a existência do programa de abate do Governo, podem realmente originar um acréscimo nas vendas e, com esta base, o ano de 2009 pode ser desprezado. Claro que este crescimento só será possível com o crescimento económico e desenvolvimento do país nos próximos anos. Apesar da taxa de variação anual de vendas entre 2004 e 2008 ser de 2% e tendo em conta o actual estado do País (Outubro de 2010), opta-se por um crescimento mais contido, sobretudo devido ao aumento do IVA em 2011 e, segundo previsões da ACAP, dever-se-á registar um aumento de vendas de veículos antes do final do ano (2010), como já aconteceu anteriormente.

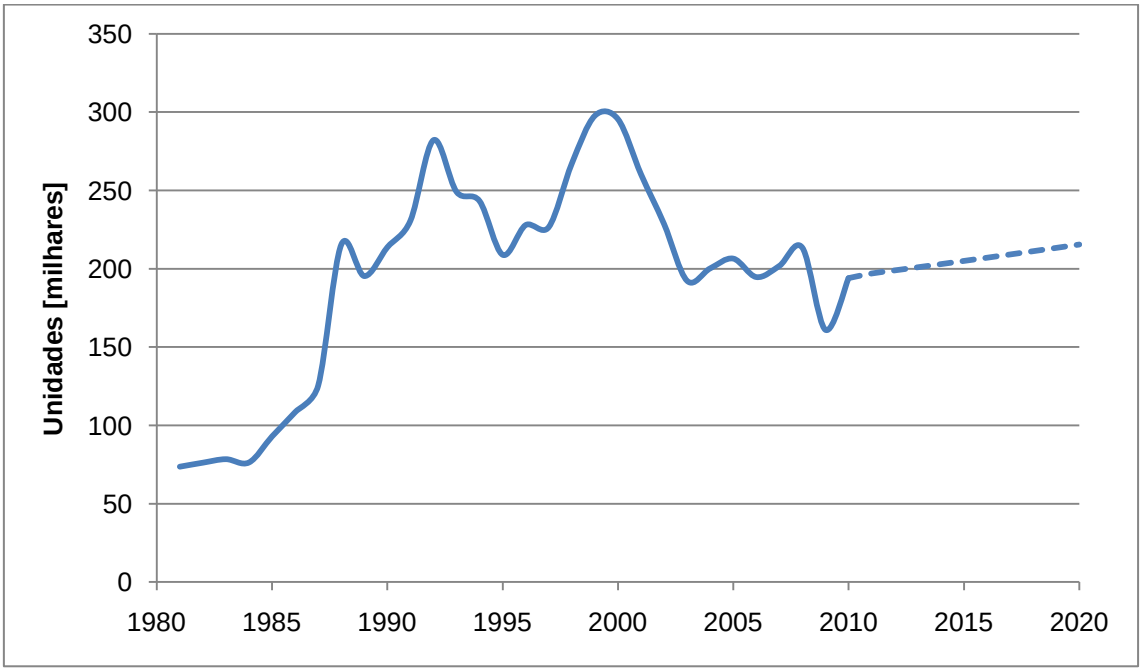


Figura 3.10 – Evolução das vendas de veículos ligeiros de passageiros até 2020.

São agora definidos os cenários de penetração de veículos eléctricos em Portugal e caracterizados na Tabela 3.3 e na Figura 3.11. Posteriormente será feita a divisão em EVs e PHEVs.

Cenário Optimista:

Venda de cerca de 5000 veículos em 2011 com direito ao incentivo de 5000€. Segundo estimativas indicadas pelo coordenador do GAMEP (Gabinete de Apoio à Mobilidade Eléctrica

em Portugal), João Dias, em 2020 pretende-se ter em circulação 750.000 veículos eléctricos. Estimados os parâmetros, verifica-se que para obter esse valor, em 2020, 80% das vendas corresponderia a veículos eléctricos (considerando o crescimento de vendas de veículos de 1%). Este seria portanto um cenário bastante optimista. No entanto, a previsão realizada é mais contida, e considera-se que em 2020, o *share* de mercado de veículos eléctricos é de 50% para este cenário.

Cenário Pessimista

Apesar do incentivo de 5000€, supõe-se que as vendas não chegam às 500 unidades em 2011, como resultado da fraca adesão da população, que permanece relutante em relação ao preço e à limitada tecnologia das baterias. Outros factores favoráveis a este cenário serão o agravamento da crise financeira e as prováveis recessões nos países da zona Euro, entre eles, Portugal. Presume-se que até 2020 a situação se vá alterando e que, nesse ano, cerca de 10% das vendas totais corresponda a veículos eléctricos.

Cenário Base

Este é um cenário intermediário dos já definidos. Nos primeiros anos de comercialização de veículos eléctricos, o elevado preço, mesmo com os incentivos, provocará uma baixa penetração inicial, de 0,5%, que corresponde a cerca de 1000 veículos e, em 2020, de 35%.

A Tabela 3.3 sumariza os vários cenários considerados indicando a percentagem de vendas totais que corresponde a veículos eléctricos, em 2011 e 2020.

Tabela 3.3 – Cenários de penetração de veículos eléctricos.

	M_{t-1} = 195000 e g = 1%		
	Pessimista	**Base**	**Optimista**
2011	0,25%	0,5%	2,5%
2020	10%	25%	50%

O primeiro ano de comercialização de EVs e PHEVs será em 2011 com o lançamento do Nissan Leaf e Opel Ampera. São assim calculados os valores de α e β de acordo com a Tabela 3.3 e as seguintes equações e obtidos os cenários indicados na Figura 3.11.

$$\alpha = \ln\left(\frac{P_t}{1 - P_t}\right) \tag{3.4}$$

$$\beta = \frac{\ln\left(\frac{P_t}{1 - P_t}\right) - \alpha}{\Delta t} \tag{3.5}$$

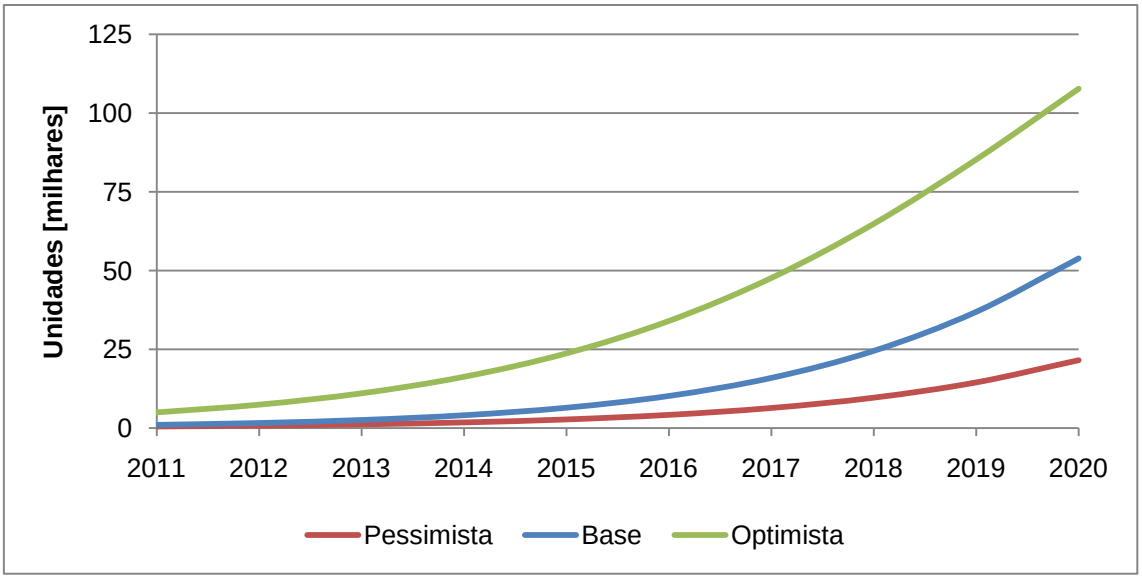


Figura 3.11 – Venda de veículos eléctricos para os vários cenários de penetração, Anexo B.1.

Como o período analisado é inferior à suposta durabilidade de um veículo eléctrico, não são consideradas saídas de frota destes veículos. De referir que os PHEVs poderão funcionar em modo PHEV limitado ou como um HEV, após as baterias terem perdido grande parte da capacidade.

Procede-se agora à divisão da previsão realizada em EVs e PHEVs. Tendo em conta as considerações referidas, é então definido o parque automóvel eléctrico, Tabela 3.4, em que se supõe que 80% das vendas correspondem a EVs e que as restantes 20% a PHEVs. Os valores indicados representam o número de EVs e PHEVs em circulação em Portugal entre 2011 e 2020, usados para determinar o impacto no SEN.

Tabela 3.4 – Veículos eléctricos em circulação em Portugal por tipo, Anexo B.1.

	Pessimista			Base			Optimista		
	Total	EV	PHEV	Total	EV	PHEV	Total	EV	PHEV
2011	492	394	98	985	788	197	4.924	3.939	985
2012	1.249	999	250	2.565	2.052	513	12.302	9.842	2.460
2013	2.412	1.930	482	5.097	4.078	1.019	23.294	18.635	4.659
2014	4.196	3.357	839	9.143	7.314	1.829	39.527	31.622	7.905
2015	6.929	5.544	1.386	15.578	12.463	3.116	63.208	50.566	12.642
2016	11.108	8.886	2.222	25.748	20.598	5.150	97.170	77.736	19.434
2017	17.471	13.977	3.494	41.654	33.323	8.331	144.780	115.824	28.956
2018	27.112	21.690	5.422	66.150	52.920	13.230	209.608	167.686	41.922
2019	41.605	33.284	8.321	103.040	82.432	20.608	294.834	235.867	58.967
2020	63.145	50.516	12.629	156.890	125.512	31.378	402.534	322.027	80.507

4 Impacto no SEN e Sustentabilidade dos Veículos Eléctricos

4.1 Sistema Eléctrico Nacional (SEN)

O SEN é um sistema complexo devido a uma série de condicionalismos a que está sujeito. A geração de electricidade tem que acompanhar o consumo devido à falta de sistemas de armazenamento, facto que resulta num sobredimensionamento do sistema e num ligar e desligar de geradores. A segurança do sistema e a qualidade da energia eléctrica têm que ser igualmente asseguradas. Estas realidades tornam a operação e optimização do sistema difícil, tornando o mercado de energia eléctrica único [3].

O SEN pode ser dividido em cinco actividades principais [25], [26]:

1. Produção de Electricidade - A produção está dividida em dois regimes, produção em regime ordinário (PRO) e produção em regime especial (PRE).
   - PRO – Relativo à produção de electricidade com base em fontes tradicionais não renováveis e em grandes centros electroprodutores hídricos.
   - PRE – Relativo à cogeração e produção a partir de fontes de energia renováveis. Beneficia de tarifas especiais. O comercializador de último recurso é obrigado a comprar a energia produzida sob este regime (actualmente EDP Serviço Universal).
2. Transporte de Electricidade - Actividade de transmissão de electricidade através da rede nacional de transmissão. Concessão à REN (Redes Energéticas Nacionais), responsável por planeamento, implementação e operação da rede.
3. Distribuição de Electricidade - Tem por base a rede nacional de distribuição, constituídas por alta, média e baixa tensão. Concessão à EDP Distribuição.
4. Comercialização de Electricidade - Existem comercializadores que podem comprar e vender energia eléctrica e têm o direito de aceder às redes de transporte e de distribuição mediante o pagamento de tarifas de acesso estabelecidas pela ERSE (Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos).
5. Operação dos Mercados de Electricidade - Fazem parte deste mercado os produtores em regime ordinário, os comercializadores, entre outros. O MIBEL (Mercado Ibérico de Electricidade) opera em Portugal e Espanha e tem actualmente dois operadores de Mercado:
   - OMEL, operado por Espanha, gere as transacções à vista.
   - OMIP, operado por Portugal, gere as transacções a prazo do MIBEL.

Podem-se definir vários cenários para o consumo de energia eléctrica, carga base, ponta e serviços de sistema associados, reservas girantes e regulação. Os vários tipos de

mercados ou geração diferem grandemente em: regime de controlo, tempo de resposta, tempo de despacho, termos de contrato e preço. Embora estes mercados sejam diferentes conforme o país ou região em questão, as matrizes são comuns [3], [27].

- Carga Base é a produção constante ligada ao consumo mínimo/médio, que ocorre a tempo inteiro e provém de centrais com baixo custo variável por kWh. A venda é usualmente realizada com contractos de longo prazo e geração constante.
- Ponta é a geração necessária nos períodos de maior consumo e é proveniente de centrais que funcionam continuamente pouco tempo. O tempo típico de chamada de uma central deste tipo é de 3 a 5 horas, acabando por funcionar algumas centenas de horas por ano, daí o preço por kWh ser elevado.
- Reserva girante é proveniente de geradores que funcionam a carga parcial, sincronizados com a rede e com rápida capacidade de resposta, de forma a colmatar a ocorrência de perturbações na rede. O preço deste tipo de geração depende da energia produzida, disponibilidade e prontidão. A capacidade de energia disponível por hora tem a unidade de MW-h. O recurso à reserva girante ocorre tipicamente 20 vezes por ano com duração compreendida entre os 10 minutos às 2 horas.
- Regulação, relaciona-se com o controlo de tensão e frequência de uma rede. O controlo de frequência é conseguido através do equilíbrio entre carga e geração, o que implica uma regulação em ambos os sentidos de potência activa. Este tipo de controlo exige uma capacidade de resposta rápida, e ocorre sempre que necessário com duração de alguns minutos. O controlo de tensão realiza-se por injecção ou absorção de potência reactiva, conseguido através de introdução de elementos capacitivos ou indutivos ou por acção de electrónica.

4.1.1 Características do SEN

Na Figura 4.1 indica-se a evolução da potência de ponta anual e do consumo no SEN usando um crescimento de 2% e 1%, respectivamente. Na determinação destes valores foram analisados os dados de anos anteriores, ajustando o crescimento à tendência dos últimos anos. Teve-se ainda em consideração as políticas de eficiência energéticas e a sua influência nas potências de ponta.

Na Figura 4.2 é representado o diagrama de carga do dia 12 de Janeiro de 2009, correspondente ao dia em que foi registada a potência máxima solicitada à rede, 9217 MW. A ponta em 2009 corresponde a um acréscimo de 244 MW à registada no ano anterior, 8973 MW. Em 2010, e, segundo os dados disponíveis até à data, é de 9390 MW – dia 11 de Janeiro (acréscimo de 183 MW).

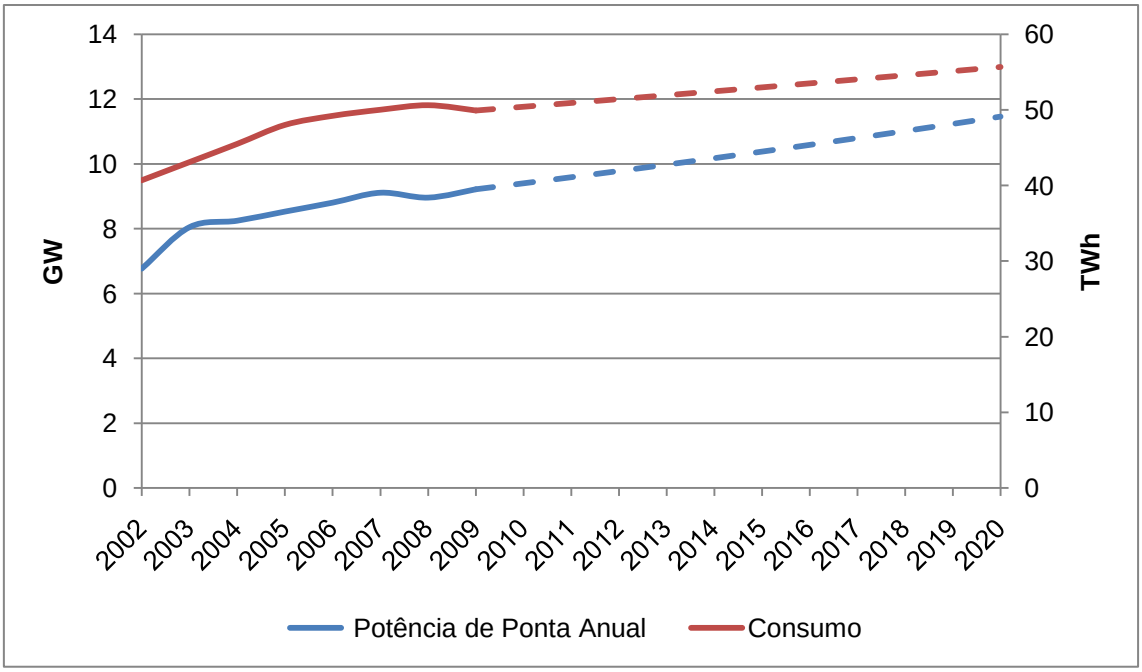


Figura 4.1 – Evolução da potência de ponta anual e do consumo em Portugal [25].

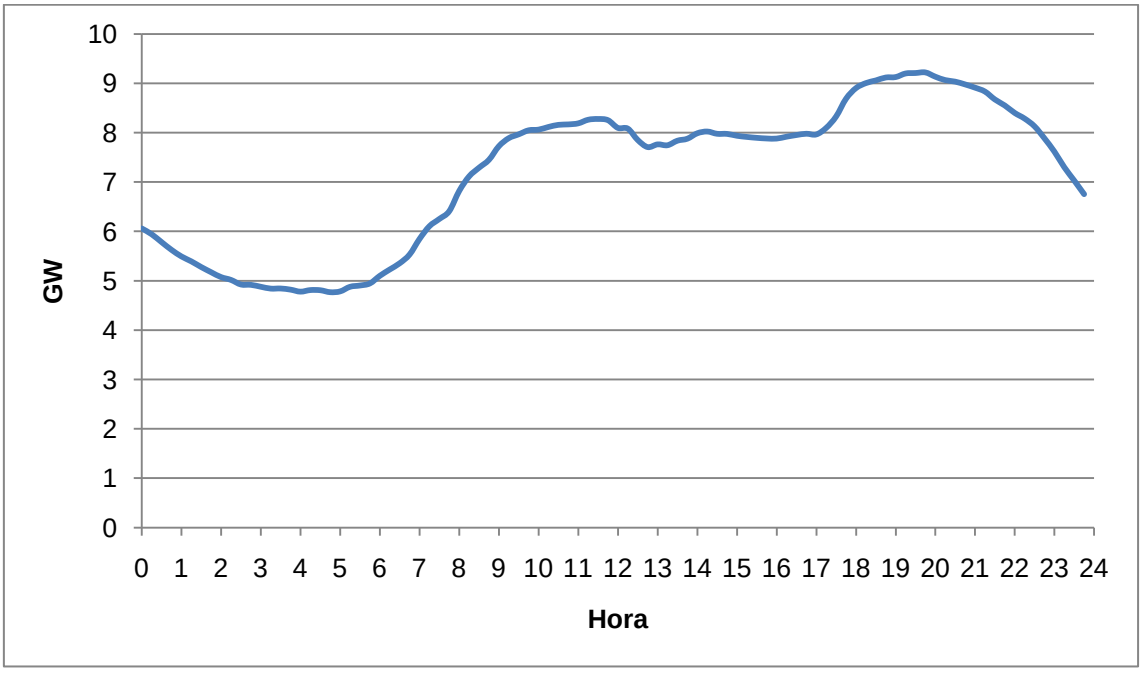


Figura 4.2 – Diagrama de carga de 12 de Janeiro de 2009 [25].

Na Figura 4.3 são indicados os diagramas de carga típicos nas diferentes épocas do ano: Primavera, Verão, Outono e Inverno. O inverno é representado pela semana que inclui o dia em que ocorreu a ponta máxima anual. Verifica-se que os níveis de potência requisitada à rede sofrem grandes variações durante todo o ano e que são típicos em cada estação do ano.

Para a mesma hora e para épocas diferentes, o consumo pode ter uma variação até 3 GW e, analisando o dia de ponta máxima, chega-se a uma diferença de 4 GW entre o vazio e a ponta. Isto reflecte a necessidade de previsão dos diagramas de carga de modo a planear a imobilização dos meios necessários, a cada momento, em prol do bom funcionamento do sistema. Os fins-de-semana são facilmente identificáveis. O vazio ocorre durante o horário nocturno e a ponta a partir das 18h, que corresponde ao fim do horário de trabalho e chegada das pessoas a casa. Os equipamentos de climatização têm uma grande influência nos diagramas de carga e é por essa razão que a ponta é registada no Inverno.

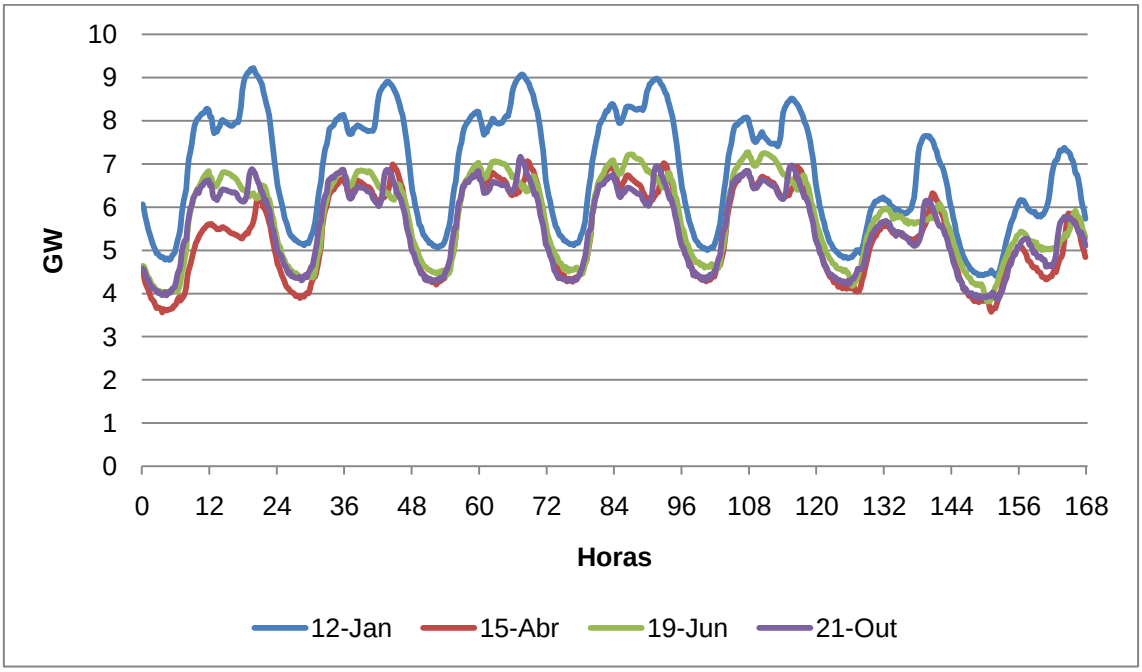


Figura 4.3 – Diagramas de carga semanais típicos de cada estação em 2009 [25].

O potencial dos veículos eléctricos, como um meio de redução de emissões e de término da dependência dos combustíveis fósseis, centra-se nas variações diárias e sazonais do consumo. Isto significa que as baterias podem ser carregadas durante as horas de vazio, quando existe bastante geração adicional disponível. Nessas alturas, o consumo do SEN é baixo e pode ser consideravelmente aumentado sem causar grandes constrangimentos ao sistema. Além disso, os idealismos dos veículos eléctricos centram-se no facto de as baterias serem carregadas à base de fontes de energia renovável e nuclear.

Na Tabela 4.1 indica-se a potência total instalada em Portugal no ano de 2009 que perfaz 16920 MW. Existe ainda a interligação com Espanha que nesse ano apresentou uma capacidade média de importação de 1261 MW e de exportação de 1165 MW.

Na Figura 4.4 representa-se o consumo final por fonte de energia em 2009, totalizando 49,9 TWh. Portugal apresenta um *mix* energético diversificado, quase 30% da energia fornecida teve origem em PRE, e o peso do carvão e gás natural foi idêntico, cerca de 23%. É

um país maioritariamente importador, sobretudo devido ao custo marginal da energia nuclear de Espanha.

Tabela 4.1 – Potência instalada em Portugal em 2009 por fonte de energia [25].

Potência Instada em 2009	
Potência Instalada PRO [MW]	11 268
Centrais Hidroeléctricas	4 578
Centrais Térmicas	6 690
Carvão	1 776
Fuel	1 476
Fuel / Gás Natural	236
Gasóleo	165
Gás Natural	3 036
Potência PRE [MW]	5 652
Hidráulica	413
Térmica	1 631
Eólica	3 524
Fotovoltaicos	82
Energia das Ondas	2

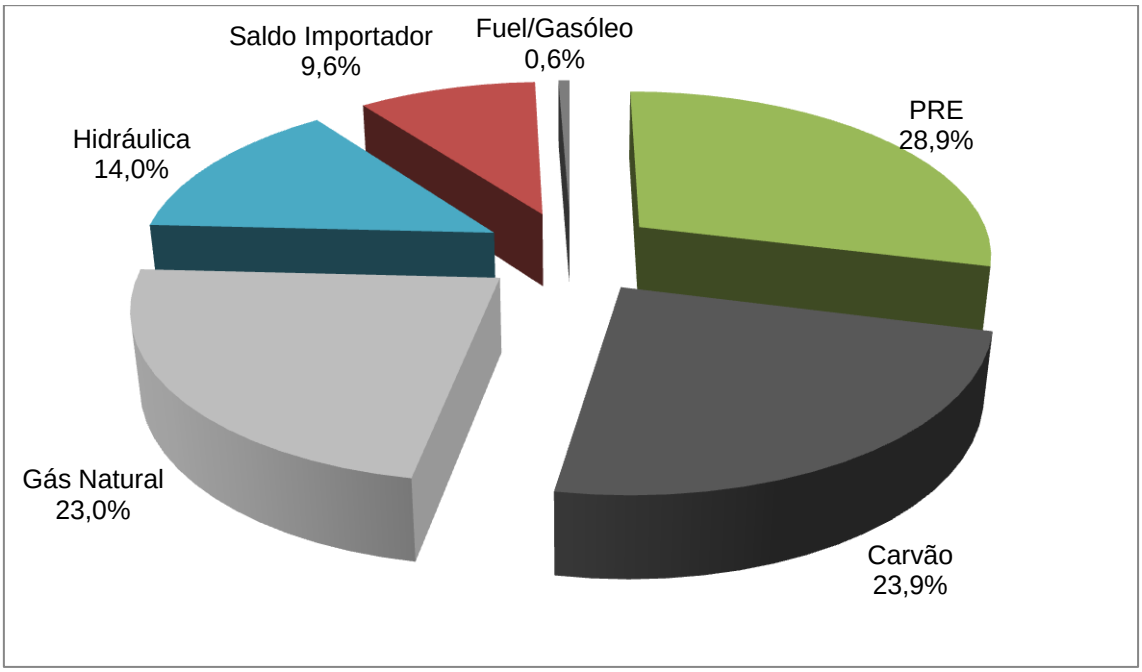


Figura 4.4 – Contributo de cada fonte no consumo em 2009 [25].

4.1.2 Renováveis em Portugal

Para a análise da actual situação e evolução da capacidade renovável instalada em Portugal, consultou-se o documento disponível na DGEG (Direcção Geral de Energia e Geologia) – Plano de Acção Nacional para as Energias Renováveis ao Abrigo da Directiva 2009/28/CE [29]. Os dados do documento usados neste trabalho estão no Anexo B[21].

As fontes de energia renovável, pela sua disponibilidade, pelo seu carácter endógeno e disperso, assumem um lugar de destaque nas políticas nacionais para o sector energético. Para um país que não dispõe de recursos fósseis conhecidos, o papel das fontes renováveis é essencial para reforçar os níveis de segurança de abastecimento, promove a diversificação do *mix* energético e contribui para aumentar a sustentabilidade associada à produção, transporte e consumo de energia [29].

A Figura 4.5 e Figura 4.6 representam mapas do território português que reflectem o potencial da energia eólica e fotovoltaica, respectivamente.

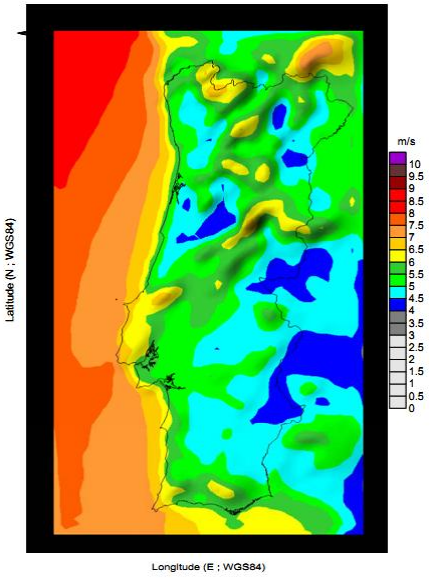


Figura 4.5 – Velocidade média horizontal a 60 m [m/s] (1999) [30].

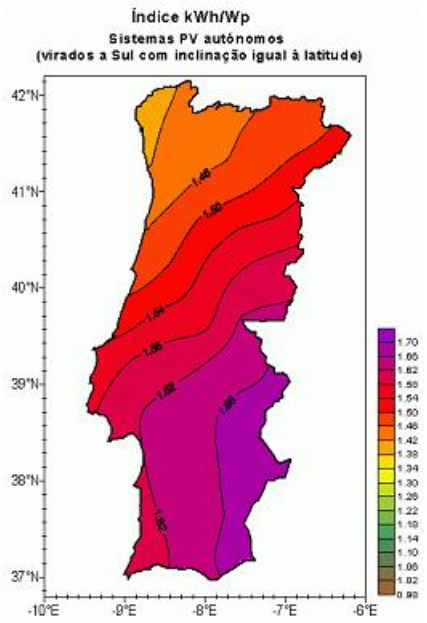


Figura 4.6 – Índice kWh/Wp em sistemas fotovoltaicos ligados à rede [31].

Nos últimos anos tem-se vindo a verificar um forte desenvolvimento da energia eólica em Portugal, tendo a potência instalada aumentado dos 506 MW em 2004 para cerca de 3524 MW em 2009, Figura 4.7. Esta progressão deverá continuar, prevendo-se que até 2012 sejam instalados 2000 MW adicionais resultantes da capacidade atribuída através de processos

[21] Também estão disponíveis dados de evolução de capacidade térmica.

concursais. Prevê-se ainda que até 2020, se encontrem instalados 6900 MW de potência, sendo 50 MW referentes a eólico *offshore* [29].

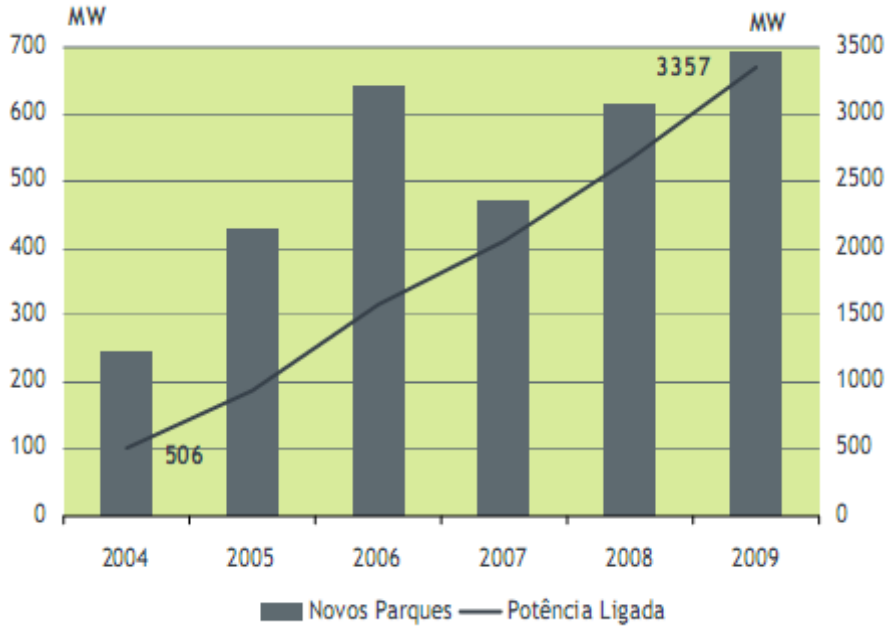


Figura 4.7 – Potência eólica total ligada – evolução anual [25].

Em relação à energia fotovoltaica, é reconhecido o seu potencial devido à disponibilidade deste recurso no país e será uma aposta na próxima década.

Para mais informações sobre outras fontes de energia renovável, aconselha-se a consulta do documento original [29].

4.2 Carregamento dos Veículos Eléctricos

Existem já alguns artigos que estudam o impacto dos veículos eléctricos no sistema de energia eléctrica. Como existem diversos factores que não são possíveis de determinar, são realizadas várias suposições em cada artigo que, analisados conjuntamente, permitem obter resultados interessantes. Como base deste estudo foram usados os artigos [18], [32], [33], [34], [35] e [12].

4.2.1 Limitações entre a Rede e o Veículo

A potência que uma ligação para carregamento das baterias de um veículo eléctrico pode garantir está limitada principalmente pela ligação física à rede. Tipicamente um veículo ligeiro tem uma potência de 90 cavalos[22] o que corresponde a cerca de 70 kW de potência máxima. As instalações eléctricas estão dimensionadas para ter uma potência mais baixa, dependendo do tipo de edifício, tipicamente 20 - 50 kW. As tomadas comuns estão dimensionadas para suportar intensidades de corrente até 16 A (cerca de 3,5 kW). Sem admitir ligações adicionais, este é o limite dominante. Na prática, a electrónica de potência e as baterias de um veículo eléctrico não funcionam como limitadores, porque permitem trânsitos de potência na ordem da potência máxima fornecida pela parte eléctrica do veículo. A mesma situação acontece para efeitos de V2G.

4.2.2 Métodos de Carga

4.2.2.1 Por Cabo

Num mundo ideal deveria existir apenas um tipo de *interface* para ligação de equipamentos eléctricos às tomadas. No entanto, o mundo real tende a ser mais complicado. Como não existe consenso nas opiniões entre a indústria automóvel, e entre os países, ainda não foi normalizado o modelo para carregamento das baterias de veículos eléctricos. No entanto existem já duas normas, SAE J1772 e IEC 62196. Isto significa que o *design* de um carregador e da infra-estrutura de carregamento deverão diferir em certos países, de acordo com a rede de energia eléctrica.

► A SAE J1772 é uma norma da América do Norte mantida pela SAE (*Society of Automotive Engineers*) e tudo indica que será usada pelos EUA e pelo Japão. A ficha é projectada para sistemas monofásicos de 120 ou 240 V e é constituída por cinco pinos: Linha AC 1, Linha AC 2/Neutro, Terra, Detector de Proximidade[23] e Controlo, Figura 4.8, e pode ser usada em dois modos, podendo fornecer até 19,2 kW [36]:

- Linha AC 1: 120 V, 1 fase, até 16 A.
- Linha AC 2: 240 V, 1 fase, até 80 A.

Estão já a ser desenvolvidos outros modos de maior tensão e de carga rápida em DC.

[22] 1 kW = 1,34 CV (cavalos).
[23] Detecta movimentos do veículo quando ligado ao carregador.

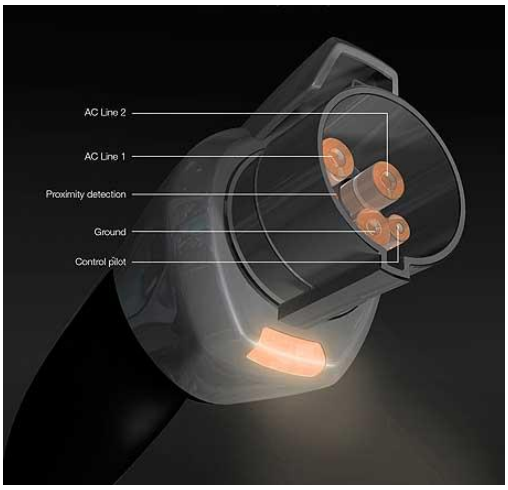


Figura 4.8 – Pormenor da ficha de acordo com a norma SAE J1772 [36].

► A norma IEC 62196 (*International Electrotechnical Commission*) permite carregamentos mais rápidos, podendo chegar a 298 kW com circuito trifásico de 690 V, 50-60 Hz e com corrente máxima de 250 A ou através de um circuito DC a 600 V e a 400 A [37]. Na Tabela 4.2 são indicados os modos definidos para o seu uso.

Tabela 4.2 – Modos de funcionamento referentes à Norma IEC 62196.

	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
Tipo de Carregamento	Normal	Semi-Rápido	Rápido	Rápido
Corrente Máxima	16 A	32 A	250 A	400 A
Sistema	1Ø ou 3Ø	1Ø ou 3Ø	1Ø ou 3Ø	DC

As características dos cabos desenvolvidos pela marca Mennekes oferecem suporte para ligação monofásica de 230 V e trifásica de 400 V com correntes de carga até 63 A, contendo assim o tamanho do cabo [38]. Este tipo de ficha é constituída por 7 pinos, dos quais 2 são usados para efeitos de comunicação, 3 correspondem às fases, 1 neutro e 1 terra, Figura 4.9.

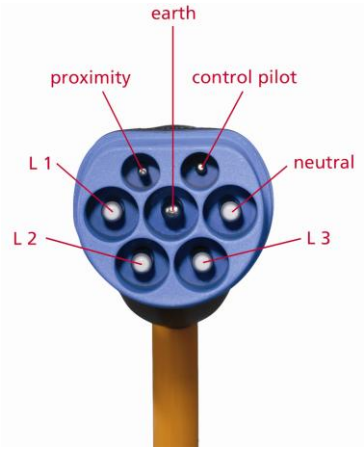


Figura 4.9 – Pormenor da ficha de acordo com a norma IEC 62196 [38].

Existem ainda opiniões de que a norma IEC 60309 é suficiente para realizar cargas normais, no entanto, esta não possui meios de comunicação com a rede e não podem adicionar inteligência ao método de carregamento.

De referir os elevados níveis de protecção de que estes cabos devem ser dotados para o efeito a que se destinam.

O Opel Ampera (marca Alemã subsidiária da General Motors (EUA)) e o Nissan Leaf (marca Japonesa) possuem uma ligação com a norma SAE J1772. Por outro lado, a rede de pontos de carregamento MOBI.E será criada segundo a norma IEC 62196, o que cria um enorme constrangimento ao condutor do veículo eléctrico, que necessita de adquirir um adaptador para efectuar a carga das baterias com sucesso.

4.2.2.2 Troca das Baterias

Uma alternativa ao carregamento rápido é a troca do conjunto de baterias de um veículo num local para esse efeito. Com esta solução, o “carregamento” pode ser efectuado sem necessidade e mais rapidamente que a carga rápida, não afectando o tempo de vida das baterias. As baterias de substituição podem ser carregadas durante o vazio, usando a carga normal ao invés da carga rápida que pode causar grandes constrangimentos na rede. Para este método se tornar possível, a indústria automóvel tem que facilitar o acesso e permitir a substituição das baterias dos seus veículos. Este método adapta-se a negócios particulares ou frotas privativas [39].

4.2.3 Características de Carregamento Considerados

Como já foi referido existem vários tipos de carregamento em função da tensão e da corrente que dependem do circuito de carga usado. Para este trabalho são considerados os definidos na Figura 4.10, ou seja:

- Carregamento Normal – Realizado em Baixa Tensão, Monofásica, 230 V a 16 ou 32 A.
- Carregamento Rápido – Realizado em Baixa Tensão, Trifásica, 400 V a 100 A.

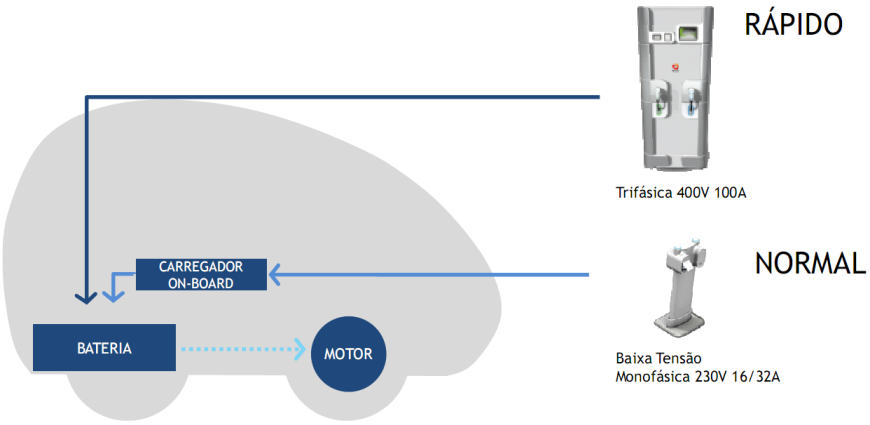


Figura 4.10 – Características de carregamento de veículos eléctricos [39].

De referir a iniciativa da associação Nova Energia, que oferece aos utilizadores um mapa de pontos de carregamento disponíveis em Portugal [22]. O mapa contém os pontos de carregamento públicos da Wattdrive (EDP), MOBI.E e outros disponibilizados por empresas e associações.

No estudo do impacto no SEN apenas é considerado o uso de carregamento normal. Supõe-se que o carregamento rápido raramente será usado, apenas em situações de grande emergência. Os problemas associados a este tipo de carregamento são a necessidade de cabos pesados, redução do tempo de vida das baterias e grande constrangimento à rede, se usado em grande escala.

Como já foi referido, de modo a prolongar o tempo de vida das baterias, existe um SOC mínimo e máximo, que determina efectivamente a energia disponível e usada na propulsão do veículo. Tendo em conta a Tabela 3.2, a capacidade das baterias do Nissan Leaf e do Opel Ampera são de 24 e 16 kWh, respectivamente. Quanto ao Nissan Leaf não existem valores entre que SOC é que a carga da bateria irá variar, mas foi anunciado um DOD aproximado de 80%, resultando em cerca de 19,2 kWh disponíveis para uso. O Opel Ampera está limitado (por

software) a SOC máximo de 85% e mínimo de 30%, resultando num DOD de 55%, ou seja, 8,8 kWh.

Na próxima figura é apresentada a característica de descarga das baterias do Chevrolet Volt. De acordo com os níveis de SOC de funcionamento, o nível de tensão da bateria após descarga completa[24] será de 325 V e, efectuado o carregamento, de 340 V. Esta variação de tensão corresponde a uma pequena variação de potência, como se verificou em [34]. Para efeitos de simulação, considera-se que o carregamento é efectuado numa zona de potência constante.

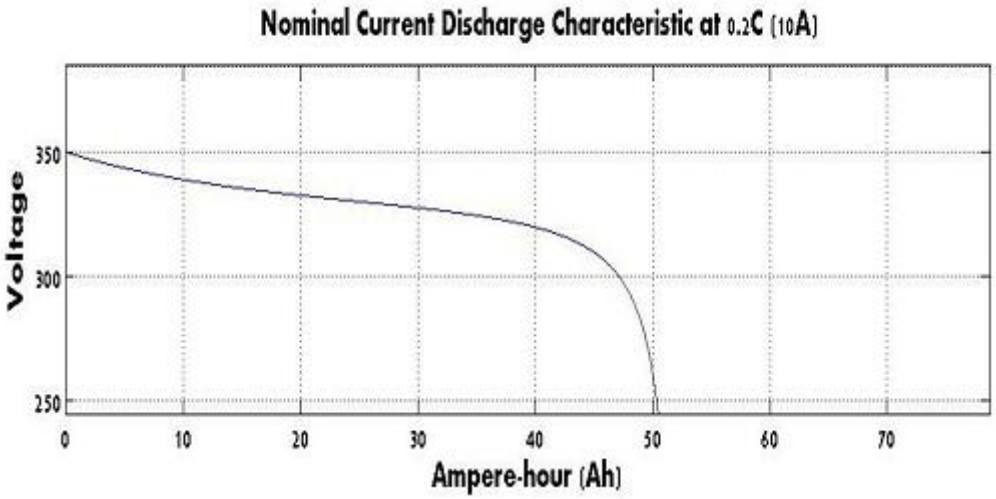


Figura 4.11 – Característica de descarga da bateria modelada em [34] com base nas especificações das baterias do Chevrolet Volt.

Na Tabela 4.3 são indicadas as características de carregamento consideradas e o seu impacto no SEN, assumindo um rendimento conjunto do circuito de carga e das baterias de 88% (e $\cos\phi = 0{,}95$) e de perdas na transmissão e distribuição de energia eléctrica nas linhas de 9%.

Tabela 4.3 – Características de carregamento consideradas (valores arredondados).

Tensão	Corrente	Potência Entregue à Bateria	Potência na Tomada	Potência no Centro Electroprodutor
230 V	16 A	3 kW	3,5 kW	3,9 kW
230 V	32 A	6,1 kW	7 kW	7,7 kW

O tempo de carregamento de um veículo eléctrico é dado em função do circuito usado e da capacidade da bateria. Na Tabela 4.4 é indicado o consumo horário para cada tipo de carregamento e veículo, quando as baterias estão sem carga (SOC mínimo).

[24] Transição do modo de funcionamento do PHEV de CD para CS.

Tabela 4.4 – Consumo por tipo de carregamento e veículo.

Carregamento	Veículo	Carga	1ª Hora	2ª Hora	3ª Hora	4ª Hora	5ª Hora	6ª Hora	7ª Hora
230V/16A	PHEV Ampera	8,8 kWh	3	3	2,8				
230V/16A	EV Leaf	19,2 kWh	3	3	3	3	3	3	1,2
230V/32A	PHEV Ampera	8,8 kWh	6,1	2,7					
230V/32A	EV Leaf	19,2 kWh	6,1	6,1	6,1	0,9			

No entanto, na realização da simulação são usados os valores da Tabela 4.5, isto porque:

- O Nissan Leaf é anunciado com uma autonomia de 160 km e tendo em conta que a maioria das deslocações da população é casa-trabalho, interessa determinar o SOC das baterias dos veículos no final do dia. Este valor depende de inúmeros factores, tais como, o percurso efectuado, o estilo de condução, o tráfego rodoviário, os equipamentos do veículo em uso, principalmente o AC, etc. Devido à inexistência destes dados em território nacional e sabendo que em Portugal, a distância média diária percorrida é de 35,6 km, é realizada uma estimativa que considera que, devido a todos os factores indicados, dos 19,2 kWh disponíveis, restam 12 kWh no final do dia[25].
- Quanto ao Opel Ampera é considerado o uso de toda a energia das baterias, supondo que as pessoas que optaram por estes veículos necessitam de percorrer maiores distâncias e, por isso, ficam salvaguardadas pelo ICE.

Tabela 4.5 – Consumo por tipo de carregamento e veículo – valores usados na determinação do impacto no SEN.

Carregamento	Veículo	Carga	1ª Hora	2ª Hora	3ª Hora
230V/16A	PHEV Ampera	8,8 kWh	3	3	2,8
230V/16A	EV Leaf	7,2 kWh	3	3	1,2
230V/32A	PHEV Ampera	8,8 kWh	6,1	2,7	
230V/32A	EV Leaf	7,2 kWh	6,1	1,1	

[25] Assumindo uma eficiência de 0,2 kWh/km.

4.2.4 Perfis de Carregamento

Para determinar o impacto no SEN é necessário estimar quando e quantos veículos estarão a carregar em cada momento e que tipo de carregamento será usado. A nova rede integrada de pontos de carregamentos fornece informação detalhada em tempo real sobre o que se passa em cada um dos pontos e podem ser elaborados perfis de uso, Anexo B.2. Como a maioria das deslocações realizadas por grande parte da frota ligeira de passageiros é casa-trabalho, será supostamente nestes locais onde os veículos irão realizar grande parte do seu carregamento, maioritariamente em casa. Deslocações a centros comerciais e supermercados representam tempos de carga entre 30 minutos a 2 horas e revelam também o seu potencial. Actualmente, só existem previsões de como serão os perfis de carregamento e por isso são elaborados três cenários diferentes, baseados em [33] e [35], com as seguintes considerações:

- Uso da distribuição normal na definição dos cenários:

$$y = f(x|\mu,\sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.1)$$

Os parâmetros da distribuição – média, μ, e desvio padrão, σ – são definidos em cada cenário.

- Características de carregamento da Tabela 4.3 e Tabela 4.5.
- Igual percentagem de EVs e PHEVs que irá entrar em carregamento.
- A maioria dos carregamentos será realizada em circuitos de 16 A, intensidade máxima suportada por cabos de 4 mm^2, normalmente instalados nas tradicionais tomadas eléctricas. Supõe-se que a instalação de circuitos que suportem 32 A nas casas dos proprietários de veículos eléctricos vá aumentando, com o objectivo de diminuir os tempos de carregamento, Tabela 4.4. No entanto, não se considera esta situação e define-se que 85% do carregamento será realizado a 16 A e, o restante, a 32 A. Os perfis usados são iguais para todos os dias da semana.

- **Cenário 1 – Carregamento Não Controlado**

Este cenário supõe que a maioria dos veículos é carregada em casa de um modo não controlado. O início do carregamento acontece quando as pessoas chegam a casa e pára quando as baterias estão carregadas. Este pode ser considerado o caso de referência que, apesar do planeamento de instalação de 1350 pontos de carregamento, a maioria das pessoas não irá ter acesso a um, quer no local de trabalho quer noutros sítios públicos. Além disso, este caso pode ser simulado como um cenário onde não existe controlo inteligente de carregamento, nem incentivos no carregamento em vazio. O perfil é indicado na Figura 4.12. Após o dia de trabalho e depois das pessoas chegarem a casa irão colocar os respectivos

veículos em carregamento por volta das 19h. Este é um perfil problemático, pois tudo indica que a ponta de carregamento de veículos eléctricos ocorra na ponta do SEN.

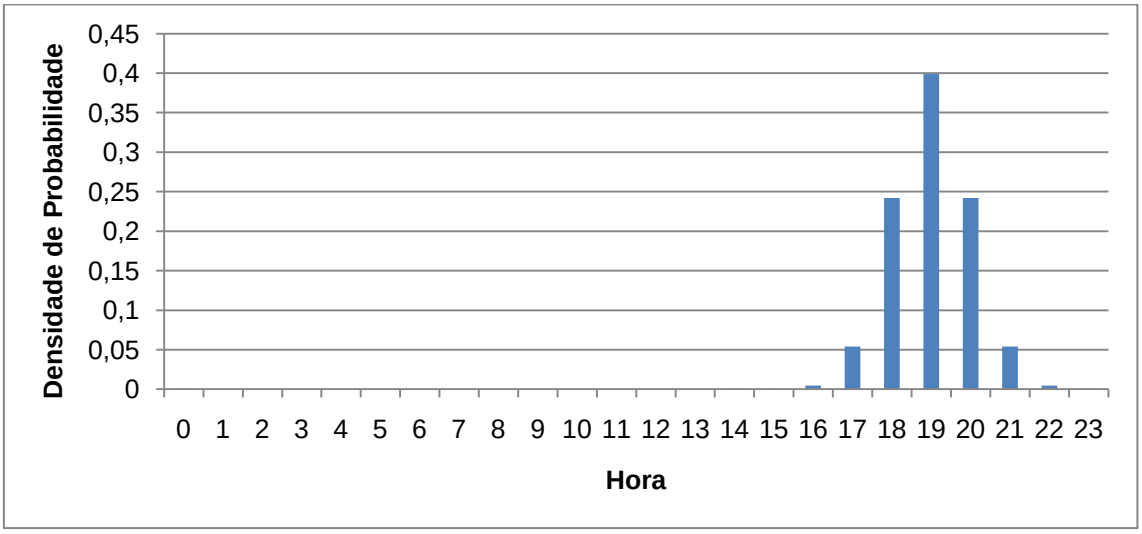


Figura 4.12 – Perfil usado no Cenário 1 – Carregamento Não Controlado; μ = 19h, σ= 1.

- **Cenário 2 – Carregamento no Vazio**

Semelhante ao primeiro, mas com a adição de controlo inteligente que atrasa o início de carregamento dos veículos eléctricos para as horas de vazio. Este controlo pode ser realizado directa ou indirectamente por uma entidade que permite que o carregamento seja efectuado nos períodos de carga mínima do SEN e aproveitar os centros electroprodutores de baixo custo marginal, o que implica baixo custo de energia eléctrica e melhor eficiência total no SEN. O controlo directo consiste em envio de sinais, por parte da entidade, para iniciar ou parar o carregamento de um grupo de veículos. O controlo indirecto resulta de um sistema inteligente, em tempo real, de análise de preços de energia eléctrica e assim optar por carregar ou descarregar (para aplicações de V2G) as baterias [35]. Da Figura 4.13 verifica-se que, tal como no caso anterior, só existe um período em que os veículos são colocados a carregar, neste caso, entre as 22h e as 2h.

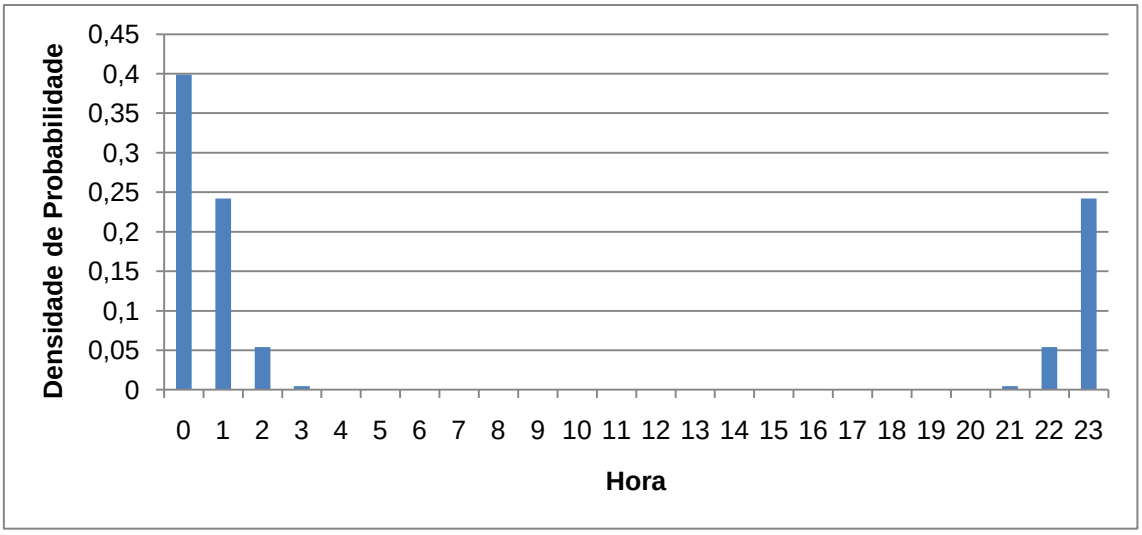


Figura 4.13 – Perfil usado no Cenário 2 – Carregamento no Vazio; μ = 24h, σ= 1.

- **Cenário 3 – Carregamento Contínuo**

Neste caso, supõe-se que grande parte do carregamento é efectuado durante o vazio, no entanto, com o aumento da penetração dos veículos eléctricos e, por consequência, o aumento de pontos de carregamento, também existirá carregamento durante o dia depois das pessoas chegarem ao trabalho, apesar de em menor intensidade. Define-se que 85% da energia fornecida às baterias ocorre durante o vazio e, os restantes 15%, dividido nas restantes alturas do dia. Foram definidas três distribuições normais.

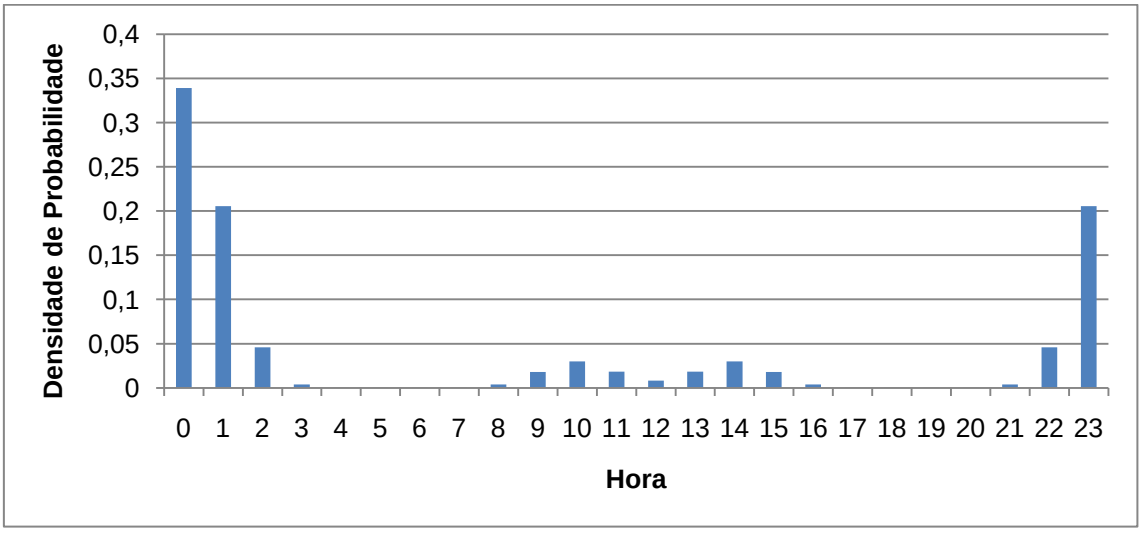


Figura 4.14 – Perfil usado no Cenário 3 – Carregamento Contínuo; μ = 24h, σ= 1, μ = 10h, σ= 1 e μ = 14h, σ= 1.

4.3 Impacto no SEN

Procede-se agora ao estudo do impacto resultante da evolução da penetração de veículos eléctricos em Portugal. São analisados os diagramas de carga de 2011, 2015 e 2020, baseados no da Figura 4.2 e assumindo todas as considerações realizadas ao longo deste texto. A previsão tem como base o dia em que foi registada a ponta anual de 2009, no dia 12 de Janeiro, porque interessa avaliar o pior caso para o SEN, de modo a analisar os constrangimentos que daí podem advir. Supõe-se que até 2020 o perfil indicado se mantenha, realizando-se apenas o ajuste devido à constante evolução das pontas anuais, Figura 4.1.

Apesar da grande aposta de Portugal nas energias renováveis, está prevista a instalação de nova capacidade térmica, que garante a segurança no abastecimento de energia eléctrica no médio e longo prazo. Existe ainda a possibilidade de, em caso de necessidade, entrar em funcionamento uma central a carvão limpo em Sines (2 grupo de 523 MW). No Anexo B.3 é indicado o cronograma de entrada em funcionamento das novas centrais de ciclo combinado [29].

Na Figura 4.15 representa-se a evolução da potência hidroeléctrica, eólica e térmica (centrais de ciclo combinado) instalada em Portugal, até 2020, segundo [29]. Estes valores irão servir de comparação às necessidades do SEN, obtidas nas previsões realizadas, e verificando se se adequam aos cenários considerados.

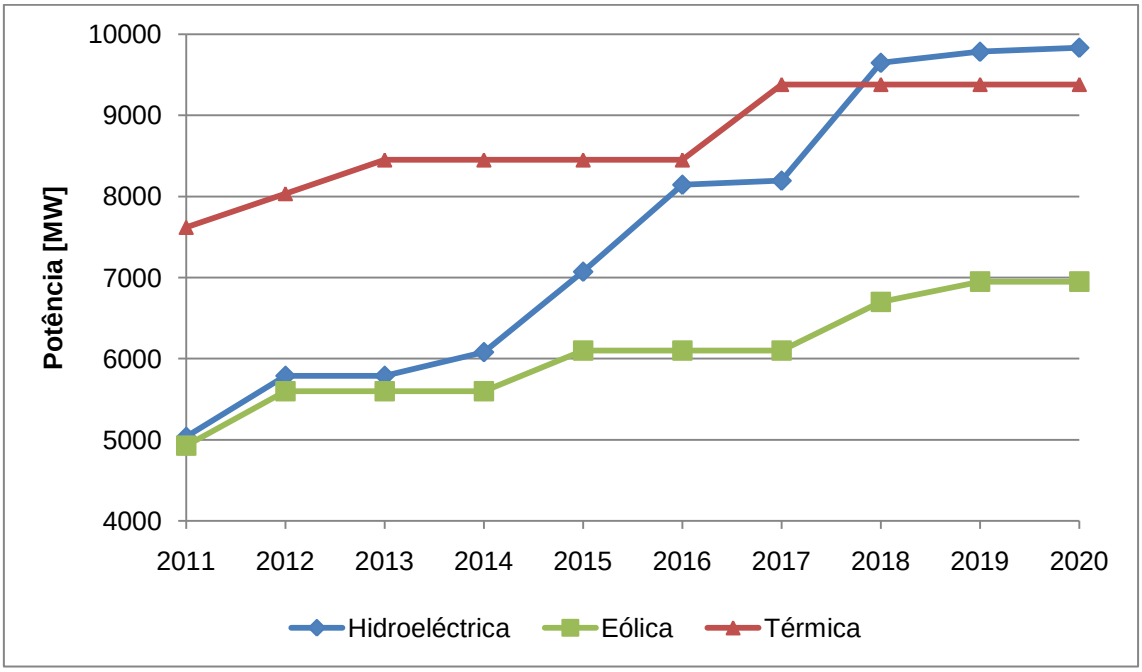


Figura 4.15 – Evolução da potência instalada[26] no SEN de acordo com [29], Anexo B.3 e B.4.

[26] Ilustram-se apenas as fontes de energia mais significantes.

Relativamente ao ano de 2011, só é analisado o cenário de carregamento não controlado, Figura 4.16, isto porque é o que representa maior impacto no SEN, devido ao início de carregamento das baterias coincidir com a ponta diária. Em 2011, os veículos eléctricos ainda estão a entrar no mercado nacional, são uma novidade e, por isso, o impacto no SEN não é evidente. Em relação à referência, 9590 MW, o aumento da ponta é de 1,43, 2,86 e 14,28 MW, para o cenário pessimista, base e optimista, com 492 e 985 e 4924 veículos eléctricos em circulação, respectivamente. Estes resultados revelam que um método de carregamento não controlado e que coincida com a ponta diária, pode resultar em aumentos significativos na ponta.

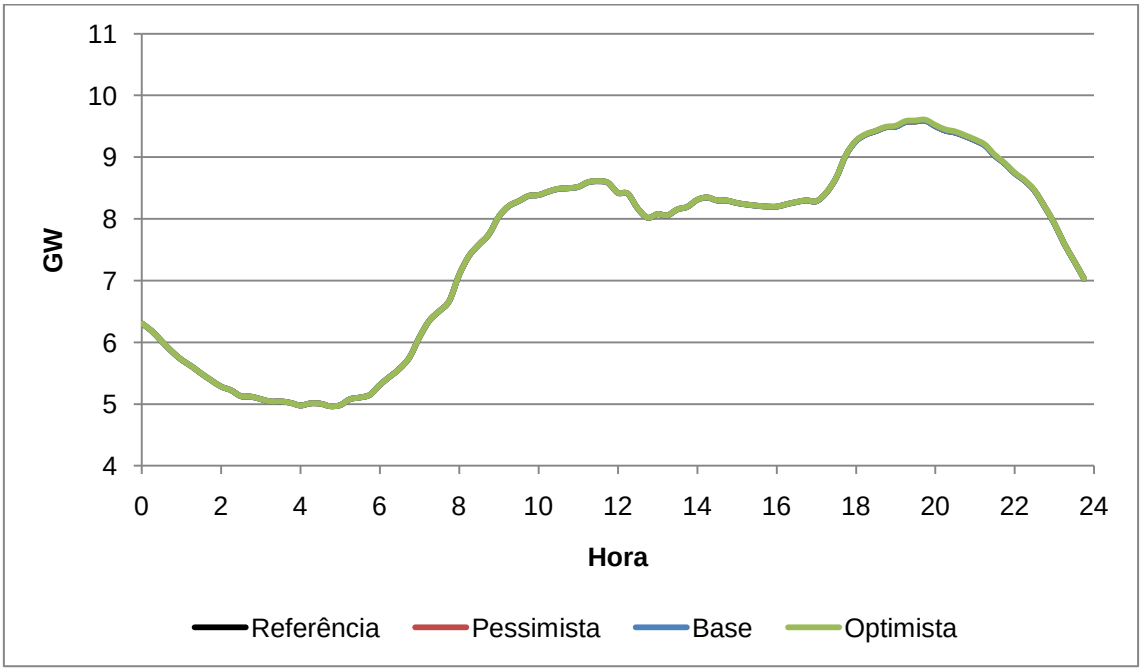


Figura 4.16 – Diagrama de carga em 2011 de acordo com o carregamento Não Controlado para os vários cenários de penetração de veículos eléctricos.

Em relação ao ano de 2015, ano médio da previsão efectuada, os diagramas de carga já apresentam algumas variações relativamente ao de referência. Por esta altura, o parque automóvel eléctrico já tem uma dimensão considerável, dependendo dos cenários de penetração considerados. Quanto ao carregamento não controlado, Figura 4.17, já são visíveis os aumentos de potência requisitada à rede durante as horas de ponta. A ponta de referência é de 10380 MW e, para o cenário pessimista, base e optimista é de 10400 MW, 10425 MW e 10564 MW, a que correspondem aumentos de 20 MW, 45 MW e 584 MW, respectivamente. No cenário optimista já existem 63208 veículos eléctricos em circulação e, segundo as estimativas, corresponde a cerca de 1,4%[27] do parque automóvel em Portugal. Nesta altura, estes

[27] Considerando que o parque automóvel é constituído por 4,5 milhões de veículos.

aumentos já são significativos e, em relação à ponta de 2009, a ponta do cenário optimista representa um aumento de 1347 MW. Contudo, de acordo com as estimativas de evolução de potência instalada, verifica-se que o SEN está preparado para esta situação. No entanto, este cenário de carregamento é de evitar, pois acarreta custos acrescidos ao SEN. Verifica-se também, que a maioria dos carregamentos está finalizada antes das 23h, não aproveitando a geração disponível durante o vazio.

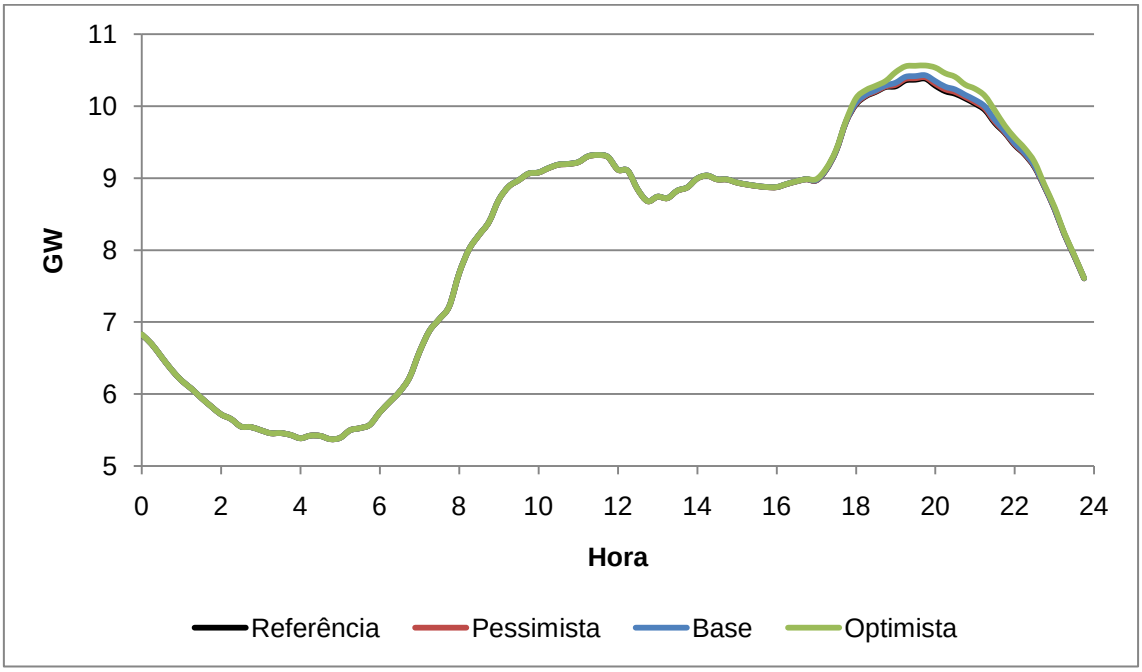


Figura 4.17 – Diagrama de carga em 2015 de acordo com o Carregamento Não Controlado para os vários cenários de penetração de veículos eléctricos.

O carregamento no vazio, Figura 4.18, e o carregamento contínuo, Figura 4.19, representam as opções com menos impacto no sistema, visto a maioria do carregamento ser realizado durante o vazio e este estar terminado até às 4h. Nesta altura, e tendo em conta o acréscimo de potência proveniente da mobilidade eléctrica, a potência total requisitada não representa nenhuns constrangimentos ao sistema. Refere-se ainda que, no carregamento contínuo, a influência do carregamento durante o dia, centralizada principalmente nos locais de trabalho, é bastante baixa[28].

[28] No cenário de carregamento contínuo, foi considerado que 15% de energia que um veículo precisa diariamente é fornecido durante esse período.

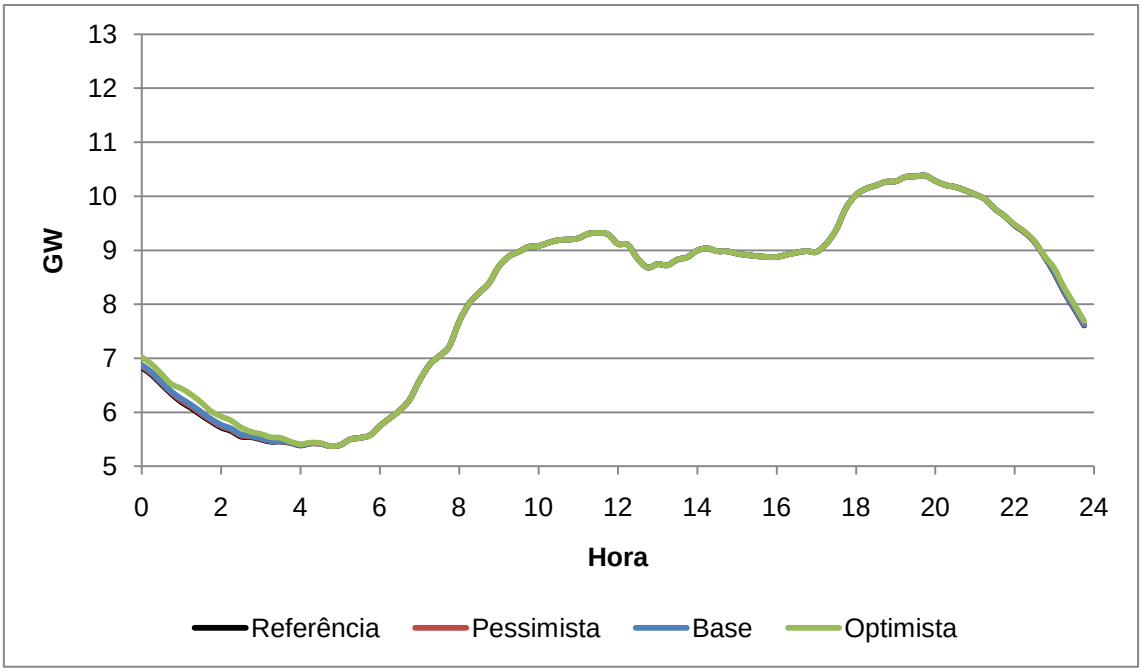


Figura 4.18 – Diagrama de carga em 2015 de acordo com o Carregamento no Vazio para os vários cenários de penetração de veículos eléctricos.

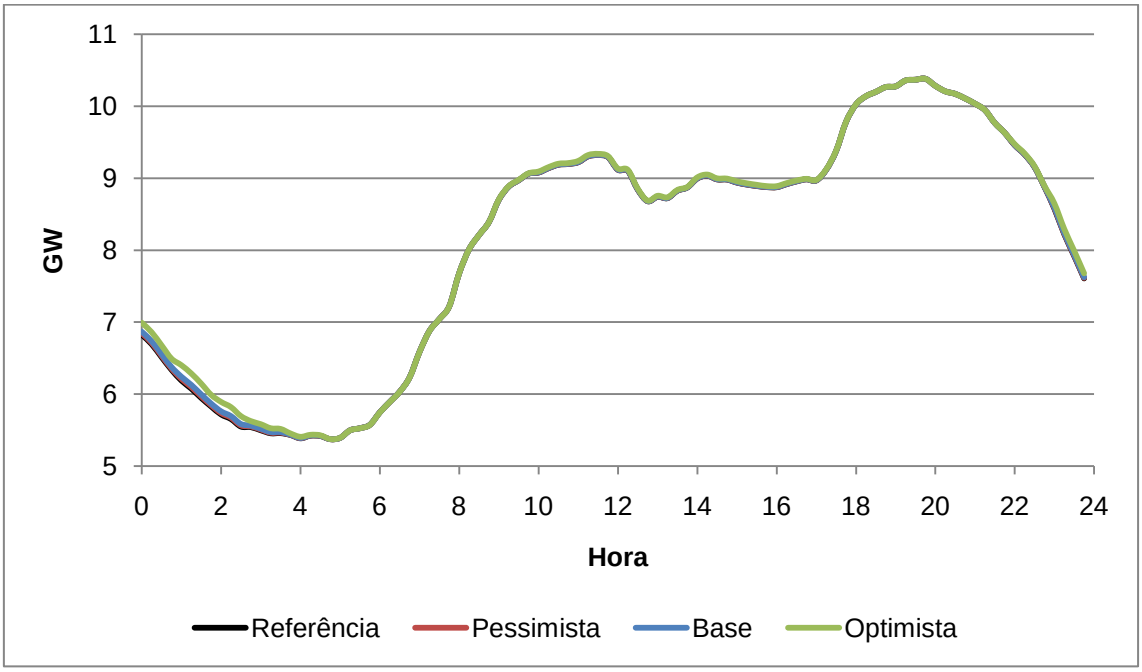


Figura 4.19 – Diagrama de carga em 2015 de acordo com o Carregamento Contínuo para os vários cenários de penetração de veículos eléctricos.

Em 2020, segundo os níveis de penetração pessimista, base e optimista, existem 63145, 156890 e 402534 veículos eléctricos em circulação em Portugal. No carregamento não controlado, Figura 4.20, a ponta de referência é de 11460 MW e, para os cenários, é de 11644 MW, 11915 MW e 12628 MW, com aumentos de 184 MW, 455 MW e 1168 MW, respectivamente. Por esta altura, no cenário optimista, o parque automóvel eléctrico já

representa 9%[29] do parque automóvel total e, se a ideia é a substituição de todos os veículos convencionais por eléctricos, convém ter noção que o carregamento simultâneo poderá corresponder a um impacto de 17 GW no sistema[30]. Este valor reflecte a importância de desenvolver métodos de controlo de carregamento directos ou indirectos e ir assim preparando uma penetração sustentável da mobilidade eléctrica em Portugal. Tendo em conta o perfil do diagrama de carga faz todo o sentido deslocar o carregamento das baterias para zonas de baixo consumo, pelo que devem surgir incentivos para que tal aconteça.

Em relação às estimativas de potência instaladas até esse ano, os reforços em fontes de energia renovável e térmica indicados, de modo a garantir a segurança do abastecimento, indicam que o SEN está preparado para todos os cenários indicados. Apenas um ano anormalmente seco, poderia pôr em causa o abastecimento.

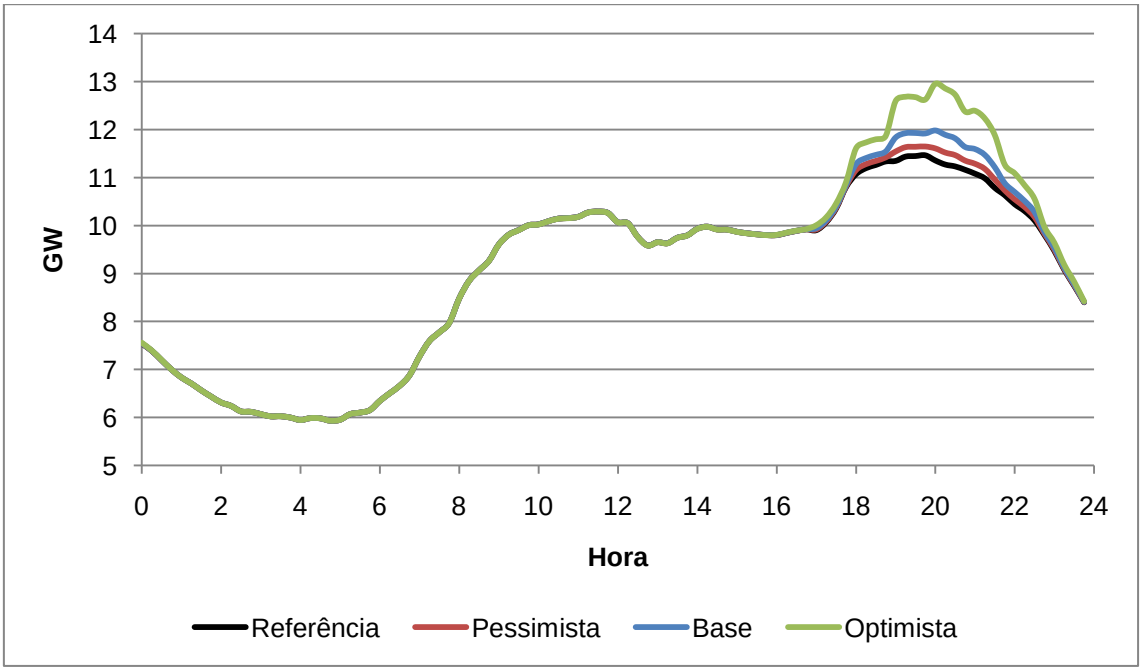


Figura 4.20 – Diagrama de carga em 2020 de acordo com o Carregamento Não Controlado para os vários cenários de penetração de veículos eléctricos.

O carregamento durante o vazio, Figura 4.21, e contínuo, Figura 4.22, representam a melhor solução a adoptar. Em 2020 o número de veículos eléctricos em circulação já é significativo, e o impacto destes no vazio pode ir até 2 GW, contudo, existe grande margem de manobra. Verifica-se que os carregamentos estão finalizados até às 5h. Apesar de no carregamento contínuo já ser visível o impacto durante o dia, a potência adicional máxima é de 122 MW. Esta situação reflecte o potencial de fornecer parte da energia às baterias, sem

[29] Considerando que o parque automóvel é constituído por 4,5 milhões de veículos.
[30] Considerando o carregamento a 230V/16A – 3,9 kW no centro electroprodutor, Tabela 4.3.

grande impacto à rede durante o dia. Tudo indica que será esta a situação que se verificará no SEN e, do estudo aqui realizado com as várias suposições como base, conclui-se que é uma solução com baixo impacto no sistema.

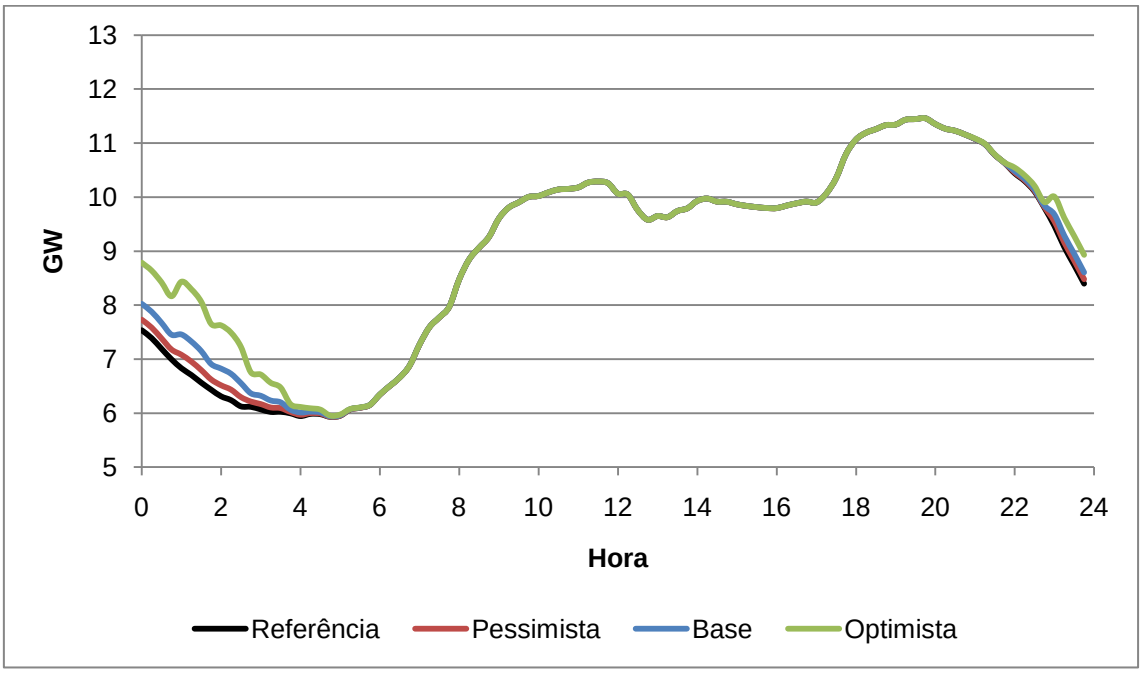


Figura 4.21 – Diagrama de carga em 2020 de acordo com o Carregamento no Vazio para os vários cenários de penetração de veículos eléctricos.

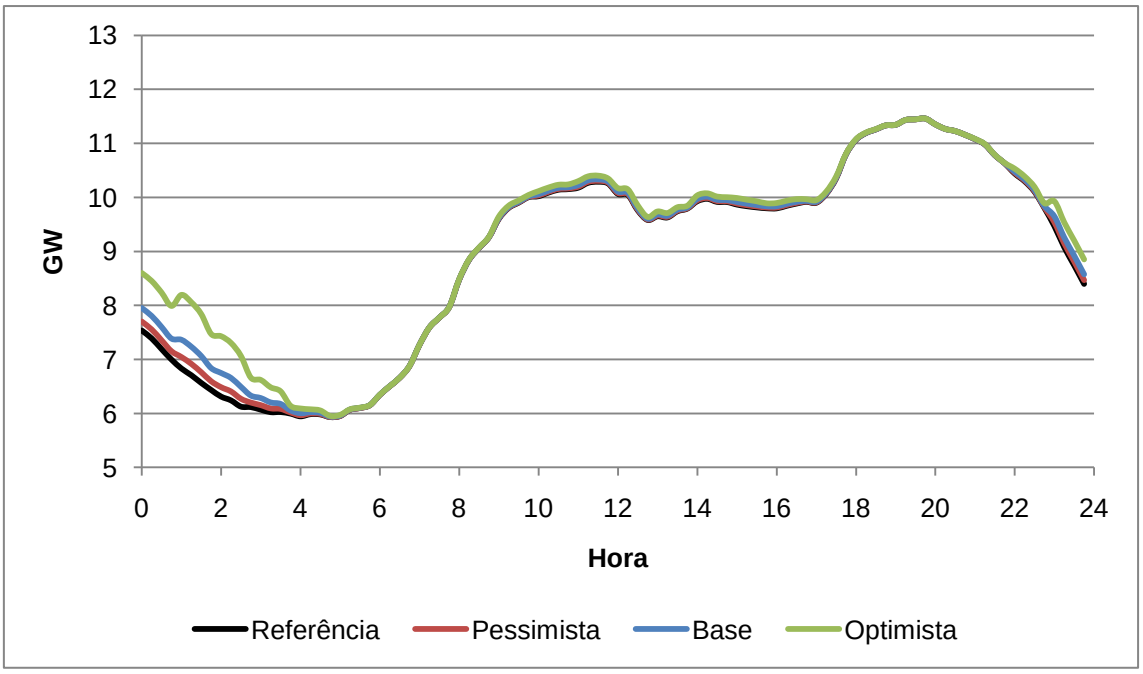


Figura 4.22 – Diagrama de carga em 2020 de acordo com o Carregamento Contínuo para os vários cenários de penetração de veículos eléctricos.

4.4 Sustentabilidade dos Veículos Eléctricos

Nesta secção é realizada uma análise rápida da sustentabilidade dos veículos eléctricos, isto porque não se tem em conta o impacto ambiental adicional das baterias e da sua produção, consultar [18]. Os consumos no modo eléctrico, Tabela 4.6, foram determinados tendo em conta todas as considerações feitas anteriormente. Em relação às características do ICE, no caso do Opel Ampera, os dados do fabricante indicam um consumo de 1,6 l/100 km e emissões de 40 g CO_2/km.

Tabela 4.6 – Consumos Considerados.

		Nissan Leaf	Opel Ampera
Tipo		EV	PHEV
Distância Média Diária Percorrida		35,6 km	+60 km
Motor Eléctrico	**Autonomia**	160 km	60 km
	$Carga_{BaterialInicial}$	19,2 kWh	60 kWh
	$Cara_{BateriaFinal}$	12 kWh	0
	Consumo	0,2 kWh/km	0,15 kWh/km
ICE	**Consumo**	-	1,6 l/100 km
	Emissões	-	40 g CO_2/km

Os veículos eléctricos, tendo em conta o contexto em que eles surgem, são máquinas de racionalização de energia, como tal, deverão ser caracterizados por um consumo baixo, e prevê-se que, em termos médios, variará entre 0,2 e 0,15 kWh/km. No entanto, é o condutor que tem grande influência no consumo, como exemplo temos: condução agressiva, o uso constante do AC (Ar Condicionado), condução a velocidades elevadas, etc. Os condutores têm que perceber que o estilo de condução tem uma grande influência no consumo energético dos veículos, e como resultado, nas emissões. Há que alterar os hábitos e adoptar estilos de condução eficientes.

4.4.1 Emissões

O aquecimento global resulta do efeito de estufa induzido pela elevada concentração de CO_2 e outros gases, tal como o metano, na atmosfera. Estes gases aprisionam a radiação infravermelha reflectida pelo solo, mantendo a energia na atmosfera, aumentando assim a sua temperatura. Como consequência surgem danos ecológicos consideráveis aos ecossistemas e desastres naturais que afectam as populações humanas. Estes últimos têm chamado cada vez mais atenção, devido à amplitude dos estragos causados – tornados, inundações, secas e o derreter do gelo do Pólo Norte e Sul, que poderá inundar zonas costeiras com o aumento do nível do mar [2].

As alterações climáticas têm vindo a ganhar cada vez maior importância como questão ambiental de relevo e alcance global. A Convenção Quadro das Nações Unidas para as Alterações Climáticas, em 1992 e, como consequência, o Protocolo de Quioto, em 1997, teve como resultado o desenvolvimento de políticas de mitigação e de adaptação às alterações climáticas. Portugal definiu três instrumentos principais para responder aos desafios da redução das emissões dos gases com efeitos de estufa (GEE), o Programa Nacional para as Alterações Climáticas (PNAC), que estabelece medidas de redução das emissões de GEE a nível sectorial, o Plano Nacional de Atribuição de Licenças de Emissão (PNALE), que define as instalações abrangidas pelo Comércio Europeu de Licenças de Emissão (CELE) e as respectivas licenças, e o Fundo Português de Carbono (FPC), que tem como objectivo o financiamento de reduções de emissões de GEE. Em [40] é caracterizada a evolução do CELE no seu período experimental (PNALE I, 2005-2007) e o cumprimento do Protocolo de Quioto (PNALE II, 2008-2012) no sector electroprodutor. Em Portugal, as emissões verificadas têm-se reduzido de ano para ano como resultado do aumento da penetração da energia eólica [40].

O ICE é uma das principais fontes de poluição urbana. Os produtos da combustão de HC de combustíveis resultam em dióxido de carbono (CO_2), água (H_2O), óxido de azoto (NOx), monóxido de carbono (CO), e HCs por queimar. O dióxido de carbono (CO_2) é essencial à vida vegetal (fotossíntese), contudo estes processos são limitados e não conseguem assimilar todo o CO_2 emitido [2].

A mobilidade eléctrica é actualmente impulsionada mais por questões ambientais do que energéticas, exemplo disto é o mandato da Califórnia (*California Air Resources Board* (CARB)) que promove os veículos com baixas emissões com o objectivo de diminuir a poluição do ar na área metropolitana do estado. Como já foi referido, os veículos eléctricos permitem centralizar as emissões nos centros electroprodutores e longe dos centros urbanos. Prevê-se que a qualidade do ar nas cidades melhore, assim como a qualidade de vida das populações. As emissões provenientes do carregamento de veículos eléctricos dependem do *mix* energético em cada momento e, por isso, difíceis de estimar.

Para efeitos de análise de emissões, interessa agora determinar a distribuição de geração de energia por fonte. Esta depende da hora em que é realizado o carregamento das baterias e das centrais em produção nesse momento. De forma a simplificar a análise e devido a um enorme conjunto de factores a que a utilização anual horária de cada fonte de energia depende, é considerada a distribuição da Figura 4.4, referente ao ano de 2009, e os dados do Anexo B.3 e B.4. São impostos os valores de energia produzida por fontes renováveis e, de modo a satisfazer o consumo dado na Figura 4.1, distribui-se a energia em falta pelas restantes fontes, supondo um acréscimo de produção à base de gás natural, como resultado da instalação de novos grupos, e a redução anual de 2%, referente à utilização de carvão e de 0,5% em relação ao saldo importador. Obtém-se assim o diagrama da Figura 4.23 para o cenário de referência, ou seja, sem veículos eléctricos. Em 2020, estima-se que o consumo

seja de 55,7 TWh e que cerca de 40, 30 e 23% provém de PRE, gás natural e hidráulica, respectivamente.

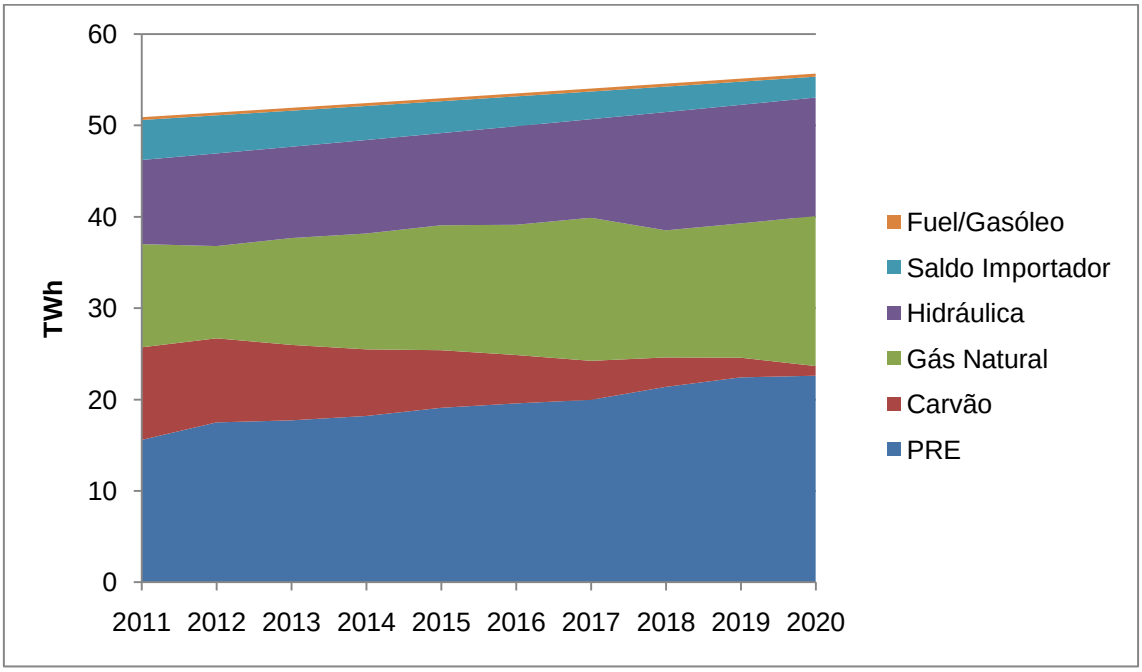


Figura 4.23 – Evolução da contribuição de cada fonte de energia para o consumo final de energia eléctrica para o cenário de referência – sem veículos eléctricos.

Na próxima figura é caracterizado o *mix* energético de Espanha com o objectivo de estimar as emissões do saldo importador característico do nosso país.

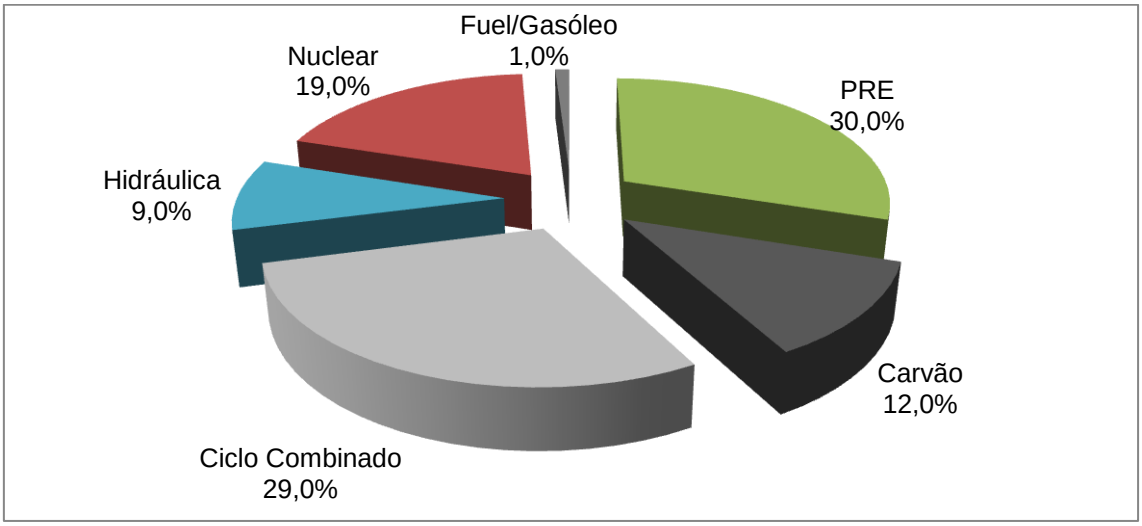


Figura 4.24 – *Mix* energético de Espanha em 2009. Consumo total de 252.772 GWh [41].

Na Tabela 4.7 indicam-se as emissões específicas por tecnologia e combustível dos centros electroprodutores em Portugal. Segundo [40], o aumento de emissões de Fuelóleo –

Gás Natural em 2008 deve-se a uma produção com maior número de arranques dos grupos e em regimes de menor rendimento ou a uma maior utilização do fuelóleo como combustível em detrimento do gás natural.

Tabela 4.7 – Emissões específicas [g CO_2/kWh] de CO_2 das centrais termoeléctricas por tecnologia e por combustível, verificadas no CELE, Portugal Continental, 2005 a 2008 [40].

	Turbina a Vapor				Ciclo Combinado
	Carvão	Fuelóleo	Fuelóleo – Gás Natural	Biomassa	Gás Natural
2005	894	768	806	34	368
2006	901	788	788	34	368
2007	895	796	850	25	368
2008	898	817	1174	9	368

Combinando os dados da Tabela 4.6, Tabela 4.7, Figura 4.4, Figura 4.23 e da Figura 4.24, determinou-se as emissões equivalentes para cada veículo no modo eléctrico, indicadas na Tabela 4.8[31].

Tabela 4.8 – Emissões específicas [g CO_2/km] de acordo com os consumos considerados.

	0,15 kWh/km	0,2 kWh/km
2011	41,75	57,57
2012	37,57	51,81
2013	36,33	50,09
2014	34,42	47,47
2015	32,51	44,83
2016	30,16	41,59
2017	28,62	39,47
2018	23,94	33,01
2019	21,78	30,04
2020	20,51	28,28

O impacto ambiental do Nissan Leaf em 2011 corresponde a cerca de 58 g CO_2/km e, do Opel Ampera, a 42 g CO_2/km. Como se espera o aumento de instalação de fontes de energia renovável e de grupos a gás natural, dever-se-á ir registando um decréscimo de emissões totais no sector eléctrico. Como resultado, de acordo com as estimativas consideradas em 2020, o carregamento dos veículos eléctricos pode ser efectuado com cerca de metade das emissões de 2011. Tendo em conta as metas impostas à indústria automóvel, em que foi estabelecido que até 2015 as emissões médias de um veículo não devem

[31] Considerou-se as emissões específicas do ano de 2007 no caso do Fuelóleo – Gás Natural.

ultrapassar 130 g CO_2/km e, após 2015, esse valor será reduzido a 95 g CO_2/km, os resultados obtidos sugerem os veículos eléctricos como um excelente atalho na redução das emissões no sector automóvel. No entanto, em Espanha, França e Inglaterra, obtêm-se emissões de 32,7, 13,2 e 85,7 g CO_2/km, respectivamente, para uma eficiência de 0,15 kWh/km. Nos dois primeiros casos, a redução de emissões em relação a Portugal centra-se na geração nuclear que, em França, fornece cerca de 75% do consumo. As emissões no Reino Unido devem-se à maioria do consumo ser realizado à base de centrais térmicas a gás e carvão. Conclui-se que o nível de sucesso ambiental dos veículos eléctricos depende do *mix* energético de cada país.

4.4.2 Custos

O outro factor a favor dos veículos eléctricos é o actual preço dos combustíveis e a sua dependência no preço do petróleo. Na Figura 4.25 é indicada a evolução do preço dos combustíveis nos últimos anos.

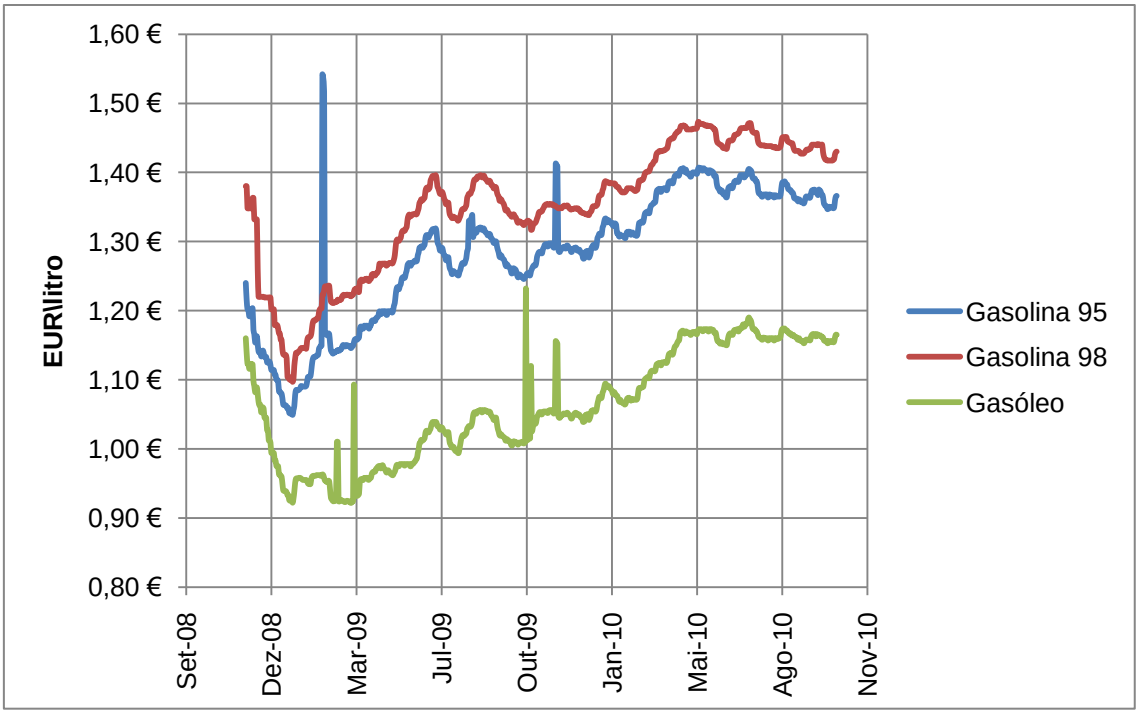


Figura 4.25 – Evolução do preço médio diário de combustíveis em Portugal [21].

Desde o início deste ano, o preço dos combustíveis tem estado mais estável, apesar da tendência de subida. São considerados os preços médios do mês de Outubro de 2010: 1,366€/L, 1,43€/L e 1,165€/L para a Gasolina 95, 98 e Gasóleo, respectivamente.

Na Tabela 4.9 são definidos os preços da energia nas horas de ponta, cheia e vazio em função da tarifa. A estes valores incide o IVA à taxa em vigor, 6%. Neste estudo, apenas são

considerados os custos de energia variáveis. Como se prevê que a maioria do carregamento seja realizado em casa, os custos fixos de energia, independentemente dos veículos eléctricos, já são suportados e, por essa razão, não são contabilizados.

Tabela 4.9 – Preços da energia actualmente em vigor – EUR/kWh [edp].

	Horas de Ponta	Horas de Cheias	Horas de Vazio
Tarifa Simples	0,1285		
Tarifa Bi-Horária	0,1382		0,0742
Tarifa Tri-Horária	0,1520	0,1332	0,0742

De acordo com a Tabela 4.6, os custos podem ser facilmente determinados.

Tabela 4.10 – Custo do abastecimento dos veículos eléctricos de acordo com os preços da energia em vigor – €/100 km [edp].

	Nissan Leaf – 0,2 kWh/km			Opel Ampera – 0,15 kWh/km		
	Horas de Ponta	Horas de Cheias	Horas de Vazio	Horas de Ponta	Horas de Cheias	Horas de Vazio
Tarifa Simples	2,75			2		
Tarifa Bi-Horária	2,96		1,59	2,15		1,15
Tarifa Tri-Horária	3,26	2,86	1,59	2,36	2,07	1,15
Gasolina 98	-			2,29		

Tendo em conta que o veículo convencional consome cerca de 7,8 l/100 km e, se for a gasóleo[32], corresponde a um custo de abastecimento de 9,09€/100 km. A poupança na tarifa bi e tri-horário durante o vazio pode ser enorme. Compete, por isso, à entidade reguladora incentivar o carregamento dos veículos eléctricos durante o vazio.

4.5 Potencial dos Veículos Eléctricos

4.5.1 V2G (*vehicle-to-grid*)

Actualmente a capacidade do SEN é de 16,9 GW. A potência média de um veículo ICE é de 70 kW e o parque automóvel em Portugal é constituído por cerca de 4,5 milhões de veículos. Posto isto, a frota automóvel em Portugal representa uma potência total de 315 GW e passa mais de 90% do seu tempo de vida estacionada. É neste contexto que surge o conceito V2G existindo, no entanto, limitações de trânsito de potência entre a rede e o veículo, como já

[32] Por ser o combustível mais barato.

foi referido. Mesmo considerando essa limitação e supondo que cada veículo pode fornecer 3 kW, a potência máxima que pode ser fornecida pelos veículos eléctricos é de 13,5 GW.

V2G representa um sistema em que a energia armazenada[33] no veículo pode ser vendida à rede eléctrica, quando o veículo não está a ser usado e se encontra ligado a esta. As preferências de carregamento e descarregamento (compra ou venda de energia à rede) devem obedecer a certas normas e protocolos. A energia disponível a injectar na rede é definida pelo condutor, de modo a salvaguardar as suas necessidades. As necessidades de armazenamento de energia por parte do condutor e por parte da rede ocorrem em instantes de tempo distintos, o que pode abrir portas a estratégias de conciliação, tal como o carregamento das baterias durante o vazio beneficiando do período de baixo consumo [3].

A energia fornecida pelos veículos eléctricos, como um serviço auxiliar, é caracterizada por ter uma qualidade superior: resposta rápida, disponível em pequenas quantidades e distribuída. A quantidade disponível deste tipo de energia depende do número de veículos ligados à rede e pode ser estimada com dados de tráfego rodoviário. Estas características complementam os mercados de reserva, ponta e regulação. Estes mercados têm associados curtos tempos de despacho o que favorece a falta de capacidade das baterias, além de necessitarem de resposta rápida e disponibilidade permanente, características que são o ponto forte de V2G.

Para o sucesso das operações V2G, a necessidade de redes inteligentes (*smart grids*), de equipamento de recarregamento de PHEVs inteligente, assim como de aparelhos de medição inteligentes para a rede e para o veículo, tornam-se essenciais.

Uma rede inteligente (*smart grid*) é uma rede que:

- Se auto-repara (*self-healing*)
- Adaptativa (*adaptative*)
- Optimizada (*optimized*)
- Distribuída (*distributed*)
- Integrada (*integrated*)
- Segura (*secure*)

Surge assim um operador de sistema (*independent system operator* (ISO)), Figura 4.26, responsável pelo controlo das operações V2G, podendo usar para efeitos de comunicação uma rede *wireless*. O operador de sistema (ISO) deverá ter as seguintes funções:

- Deve atribuir um endereço IP a cada veículo
- Comunicar à rede eléctrica que determinado veículo está pronto para a operação V2G
- Gerir permissões de acesso à rede e a monitorização do trânsito de energia

[33] No caso do FCV, a energia poderia ser produzida a partir do Hidrogénio.

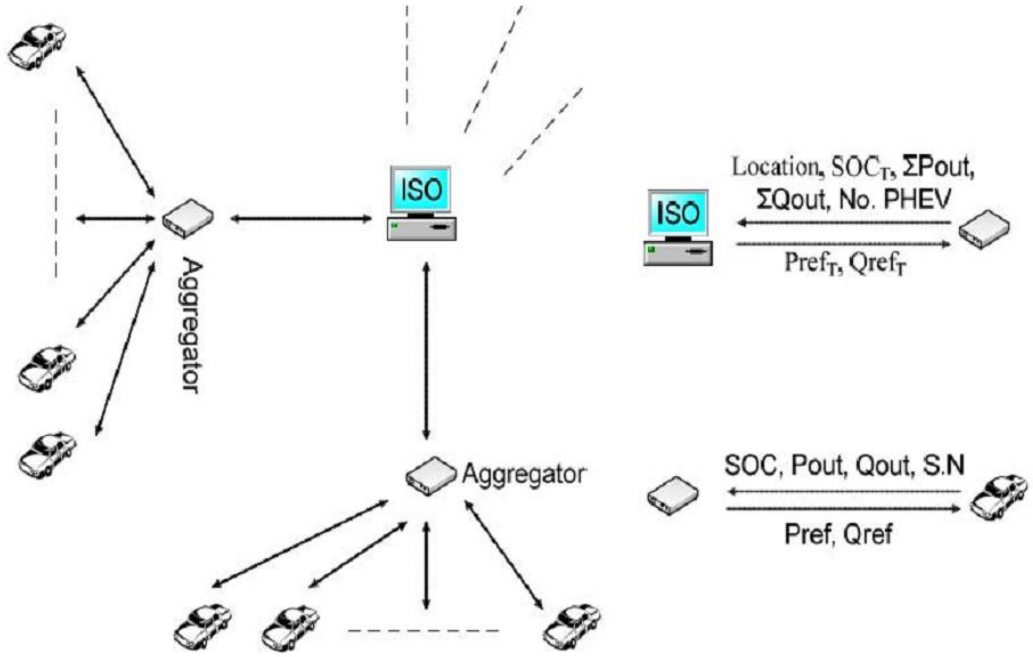


Figura 4.26 – Estrutura do sistema V2G. P_{ref} e Q_{ref} são os valores de referência de potência activa e reactiva gerados pelo ISO para cada veículo eléctrico. S.N. é o *serial number* de cada veículo. P_{out} e Q_{out} são a potência activa e reactiva reais fornecida por cada veículo. SOC_T corresponde à energia total de um determinado agregado de veículos [42].

Para mais informações sobre este assunto consultar [27] e [28].

4.5.2 Regulação da Geração Eólica

A falta de armazenamento constitui uma grande limitação do sistema eléctrico. Com a tendência actual de instalação de energias renováveis, esta limitação agrava-se, devido ao carácter intermitente e imprevisível destas, requerendo maior intervenção por parte da reserva girante e regulação. Para elevadas taxas de penetração de fontes renováveis na rede, o carácter intermitente das renováveis pode ser resolvido através do aumento das reservas ou de armazenamento. A vantagem do armazenamento consiste em conseguir-se absorver os excessos de potência de geração que possam ocorrer. O V2G pode fazer o papel de suporte para fontes renováveis em larga escala, através dos serviços de sistema e de armazenamento [3].

Em [42] é analisado o potencial dos PHEVs na redução da variabilidade da geração eólica descentralizada. O objectivo principal consiste em regular o diagrama de geração eólica, Figura 4.27.

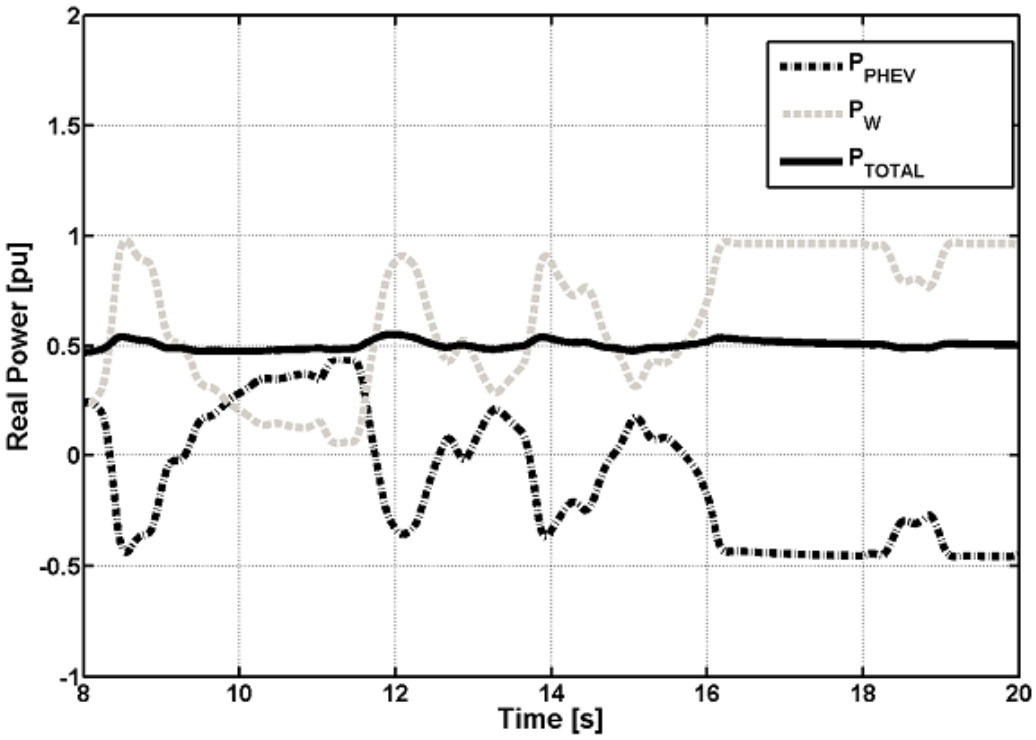


Figura 4.27 – Redução da variabilidade de geração eólica (P_W) usando PHEVs [42].

Como já foi referido, os veículos eléctricos podem fornecer uma resposta rápida e funcionar como geração e carga distribuída. Tornam-se por isso ideais para serviços de regulação, no entanto, a sua viabilidade é posta em causa com as características das actuais baterias. As mais recentes baterias Li-Ion ainda são bastante limitadas e o fornecimento deste tipo de serviço resulta numa degradação das mesmas. Com os avanços tecnológicos nesta área, este tipo de negócio pode, de certa maneira, vir a ser largamente explorado com a mobilidade eléctrica.

5 Estudo de um Caso – Impacto na Rede

5.1 Trânsito de Energia

O trânsito de energia é a solução em regime estacionário de um sistema de energia eléctrica (SEE), compreendendo os geradores, a rede e as cargas. Consiste na determinação das tensões nos nós e dos trânsitos de potência activa e reactiva em todos os elementos da rede em função do perfil de geração e de carga. Neste ponto é descrito a metodologia usada no cálculo do trânsito de energia baseado em [43].

O número de nós (barramentos) e de ramos (linhas e transformadores) é muito elevado para um sistema de grande porte e as equações que o modelam são não-lineares, o que exige o recurso a um meio de cálculo potente.

O trânsito de energia compreende os seguintes passos:

- Formulação de um modelo matemático que represente com suficiente rigor o sistema físico real.
- Especificação do tipo de barramentos e das grandezas referentes a cada um.
- Solução numérica das equações do trânsito de energia, a qual fornece o valor das amplitudes e argumentos das tensões em todos os barramentos.
- Cálculo das potências que transitam em todos os ramos – linhas e transformadores.

5.1.1 Valores por Unidade

Na análise de um SEE é preferível exprimir as grandezas eléctricas em valores por unidade (p.u.), ou seja, em fracção do valor base – valores nominais ou de plena carga. Como resultado:

- Permite tratar o transformador como ideal, relação de transformação unitária.
- Facilita a visualização dos níveis de tensão na rede, mesmo para áreas com diferentes níveis de tensão, sendo 1,0 p.u. o valor nominal (referência).
- Facilita a detecção de erros.
- É reduzido o uso do factor $\sqrt{3}$ em sistemas trifásicos.

O valor p.u. é uma quantidade adimensional e é obtido por:

$$valor\ p.u. = \frac{valor\ da\ grandeza}{valor\ de\ base} \tag{5.1}$$

5.1.2 Matriz de Admitâncias Nodais

A matriz de admitâncias nodais possui dimensão $n \times n$ (em que n representa o número de nós do sistema).

$$[\boldsymbol{Y}] = \begin{bmatrix} \boldsymbol{y}_{11} & \cdots & \boldsymbol{y}_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \boldsymbol{y}_{n1} & \cdots & \boldsymbol{y}_{nn} \end{bmatrix} \tag{5.2}$$

É uma matriz complexa e simétrica, que pode ser composta em parte real e imaginária:

$$[\boldsymbol{Y}] = [G] + j[B] \tag{5.3}$$

Onde $[G]$ e $[B]$ são a matriz das condutâncias nodais e a matriz das susceptâncias nodais, respectivamente.

- O elemento diagonal $\boldsymbol{y}_{ii}$ calcula-se pela soma das admitâncias de todos os ramos ligados ao nó i (o seu valor é sempre diferente de zero).
- O elemento não diagonal $\boldsymbol{y}_{ij}$ $(i \neq j)$ é dado pelo simétrico da admitância do ramo que liga os nós i e j (o seu valor é nulo, se estes nós não estiverem ligados).

Dado que, numa rede eléctrica, cada nó só está ligado aos que lhe são vizinhos, o número de elementos nulos da matriz é muito elevado: diz-se que a matriz é esparsa.

A matriz de admitâncias nodais é construída a partir dos modelos equivalentes dos elementos que constituem o sistema. Neste caso, só existem linhas.

Uma linha pode ser representada por um esquema equivalente em π, Figura 5.1, em que $\boldsymbol{Z}_L = R_L + jX_L$ e $\boldsymbol{Y}_T = jB_T$.

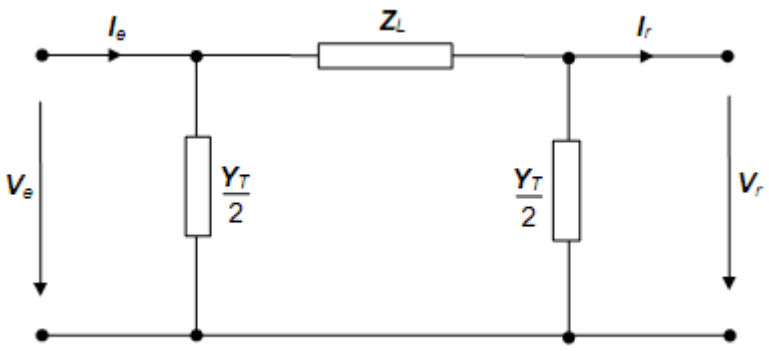


Figura 5.1 – Esquema equivalente em π nominal de uma linha.

Para um sistema com dois barramentos:

$$\boldsymbol{y}_{11} = \frac{\boldsymbol{Y}_T}{2} + \frac{1}{\boldsymbol{Z}_L}$$

$$\boldsymbol{y}_{12} = \boldsymbol{y}_{21} = -\frac{1}{\boldsymbol{Z}_L} \qquad (5.4)$$

$$\boldsymbol{y}_{22} = \frac{\boldsymbol{Y}_T}{2} + \frac{1}{\boldsymbol{Z}_L}$$

5.1.3 Tipos de Barramento

Num SEE existem três tipos de barramento que se distinguem pelas variáveis conhecidas, especificadas e calculadas.

Tabela 5.1 – Tipos de barramentos.

Tipo de Barramento	Variáveis conhecidas		Variáveis especificadas		Variáveis calculadas	
Referência/balanço	P_C	Q_C	V	θ	P_G	Q_G
PQ (carga ou geração)	P_C	Q_C	P_G	Q_G	V	θ
PV (geração)	P_C	Q_C	P_G	V	Q_G	θ

Neste caso, além do barramento de referência, todos os outros são do tipo PQ, simplificando o método de cálculo.

5.1.4 Método de Newton-Raphson

O método de Newton-Raphson é a referência na solução do trânsito de energia, convergindo em três a cinco iterações, independentemente do número de barramentos da rede – desde que não haja infracção de limites de potência reactiva que obriguem a alteração do tipo de nó. Este método consiste numa abordagem iterativa na resolução de equações não lineares.

5.1.4.1 Algoritmo

Considere-se o sistema de equações:

$$\begin{cases} f_1(x_1, \cdots, x_n) = y_1 \\ \cdots \\ f_i(x_1, \cdots, x_i, \cdots, x_n) = y_i \Leftrightarrow [f[x]] = [y] \\ \cdots \\ f_n(x_1, \cdots, x_n) = y_n \end{cases} \quad (5.5)$$

Tomando um valor inicial estimado$[x^o]$ para o vector das incógnitas tem-se:

$$[f[x^o + \Delta x^o]] = [y] \quad (5.6)$$

Linearizando a função em torno de$[x^o]$, vem:

$$[f[x^o]] + [J^o][\Delta x^o] = [y] \quad (5.7)$$

Ou ainda:

$$[J^o][\Delta x^o] = [\Delta y^o] \quad (5.8)$$

onde $[J]$ é uma matriz $n \times n$ designada por Jacobiano:

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

$[\Delta x]$e $[\Delta y]$ são vectores com n componentes:

$$[\Delta x] = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

$$[\Delta y] = \begin{bmatrix} y_1 - f_1[x] \\ \vdots \\ y_n - f_n[x] \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Na iteração k, a equação (5.8) escreve-se:

$$[J^k][\Delta x^k] = [\Delta y^k] \quad (5.12)$$

Este sistema de equações lineares pode resolver-se em ordem a $[\Delta x^k]$ por inversão do Jacobiano:

$$[\Delta x^k] = [J^k]^{-1}[\Delta y^k] \quad (5.13)$$

Adicionando o acréscimo $[\Delta x^k]$ ao vector das incógnitas $[x^k]$ obtido na iteração anterior (ou ao valor inicialmente estimado), obtém-se uma melhor aproximação da solução final:

$$[x^{k+1}] = [x^k] + [\Delta x^k]$$
$$= [x^k] + [J^k]^{-1}[\Delta y^k] \tag{5.14}$$

Note-se que o Jacobiano tem de ser recalculado em cada iteração, usando os valores das incógnitas na iteração anterior.

5.1.4.2 Processo Iterativo

O processo iterativo de cálculo das tensões decorre de acordo com o fluxograma da Figura 5.2, compreendendo os seguintes passos:

1. Estimar os valores iniciais das tensões nos barramentos.
2. Calcular os erros de fecho ΔP_i e ΔQ_i entre os valores especificados e calculados das potências activa e reactiva injectadas.

$$\Delta P_i^k = P_i^{esp} - P_i^{calc^k} \tag{5.15}$$

$$\Delta Q_i^k = Q_i^{esp} - Q_i^{calc^k} \tag{5.16}$$

Com,

$$P_i^{calc} = \sum_{j=1}^{n} V_i V_j \left[G_{ij}\cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij}\sin(\theta_i - \theta_j)\right],\ \ i = 1, \cdots, n \tag{1.1}$$

$$Q_i^{calc} = \sum_{j=1}^{n} V_i V_j \left[G_{ij}\sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij}\cos(\theta_i - \theta_j)\right],\ \ i = 1, \cdots, n \tag{1.2}$$

3. Calcular o Jacobiano $[J^k]$.

$$[J^k] = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \tag{5.17}$$

O Jacobiano tem dimensão 2(n – 1) x 2(n – 1) e é uma matriz assimétrica, ainda que topologicamente simétrica – a um elemento não diagonal (não) nulo no triângulo superior corresponde um elemento (não) nulo no triângulo inferior. Os seus elementos calculam-se analiticamente a partir das equações do trânsito de energia, obtendo-se:

$$H_{ij} = L_{ij} = V_i V_j \left[G_{ij}\sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij}\cos(\theta_i - \theta_j)\right] \tag{5.18}$$

$$N_{ij} = -J_{ij} = V_i V_j \left[G_{ij}\cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij}\sin(\theta_i - \theta_j)\right] \tag{5.19}$$

Para $i \neq j$;

$$H_{ii} = -Q_i - B_{ii}V_i^2 \tag{5.20}$$

$$N_{ii} = P_i + G_{ii}V_i^2 \tag{5.21}$$

$$J_{ii} = P_i - G_{ii}V_i^2 \tag{5.22}$$

$$L_{ii} = Q_i - B_{ii}V_i^2 \tag{5.23}$$

Para $i = j$;

4. Calcular os acréscimos $\Delta\theta$ e ΔV resolvendo o sistema de equações:

$$\begin{bmatrix}\Delta P_k \\ \Delta Q_k\end{bmatrix} = [J^k]\begin{bmatrix}\Delta\theta^k \\ \Delta V^k / V^k\end{bmatrix} \tag{1.3}$$

5. Para os barramentos *PQ*, actualizar os valores da amplitude e argumento da tensão:

$$V_i^{k+1} = V_i^k + \Delta V_i^k \tag{5.24}$$

$$\theta_i^{k+1} = \theta_i^k + \Delta\theta_i^k \tag{5.25}$$

6. Para os barramentos PV, actualizar o valor do argumento pela equação anterior e calcular a potência reactiva injectada:

$$Q_i = \sum_{j=1}^{n} V_i V_j \left[G_{ij}\sin\left(\theta_i - \theta_j\right) - B_{ij}\cos\left(\theta_i - \theta_j\right)\right] \tag{5.26}$$

7. Caso a potência reactiva esteja fora dos limites máximo e mínimo impostos pelo gerador, dever-se-á reclassificar o barramento como falso PQ. Na iteração seguinte calcula-se a potência reactiva (usando os valores especificados da tensão para todos os barramentos PV): se estiver dentro dos limites o barramento volta a ser classificado como PV.

8. Repetir até à convergência, atingida quando os valores absolutos dos erros de fecho e ΔP_i e ΔQ_i se tornarem inferiores a uma tolerância ε arbitrariamente pequena (tipicamente, 0,01 MW/Mvar):

$$|\Delta P_i|, |\Delta Q_i| < \varepsilon \tag{5.27}$$

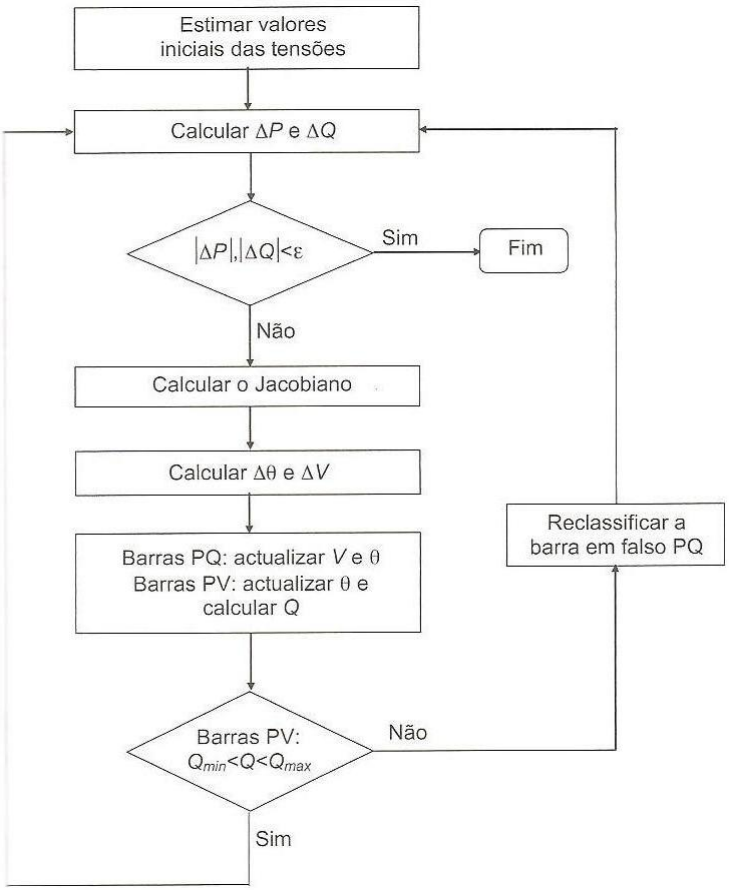


Figura 5.2 – Fluxograma do processo iterativo para o método de Newton-Raphson [43].

5.2 Rede de 5 Barramentos

Na Figura 5.3 representa-se a rede de distribuição usada na simulação, baseada em [44].

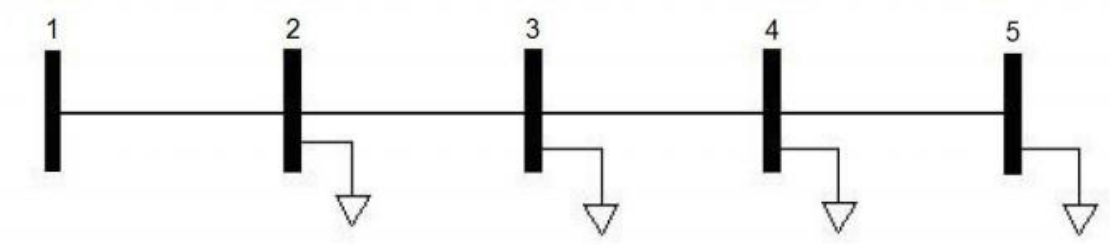


Figura 5.3 – Rede de distribuição radial de 12,66 kV que possui 5 barramentos [44].

As informações das linhas e barramentos são apresentadas no Anexo C. A razão entre R/X em cada ramo é aproximadamente 2.

5.2.1 Perfil de Cargas

De forma a analisar o impacto do carregamento de veículos eléctricos na rede de distribuição e, como este depende do nível de potência, da hora e da duração do carregamento, a simulação é realizada ao longo de um dia.

É usado o perfil de carga diário obtido em [44], em que se ponderou um consumo residencial e comercial de 70 e 30%, respectivamente, Figura 5.4. Obteve-se assim um diagrama de carga misto.

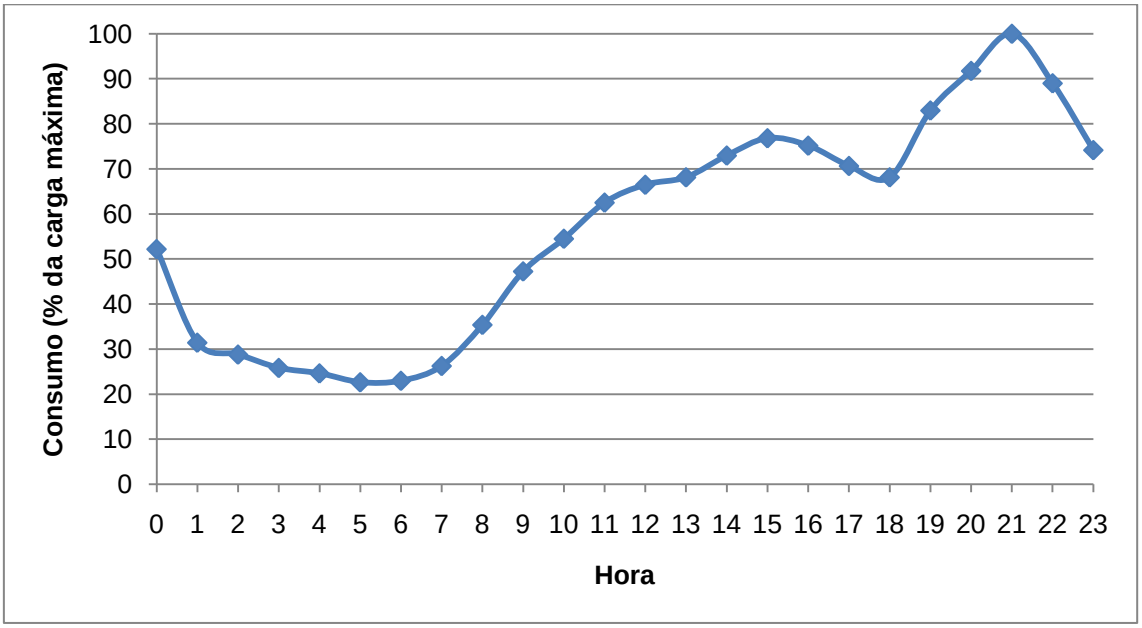


Figura 5.4 – Diagrama de carga misto (70% - residencial e 30% - comercial) [44].

Considera-se que todos os barramentos apresentam este perfil e a carga máxima corresponde à potência consumida em cada nó, Anexo C.

5.2.2 Cenários de Carregamento

Os veículos eléctricos, quando em carregamento, representam uma nova carga que pode consumir mais de 40 kW. Nesta simulação considera-se que, Tabela 4.3:

- O carregamento normal corresponde a 230V/16A monofásico e o rápido a 400V/100A trifásico (assumindo um rendimento conjunto do circuito de carga e das baterias de 88% (e $\cos\phi = 0{,}95$)).
- As baterias consomem cerca de 8,8 kWh.
- Carregamento simultâneo.

Tabela 5.2 – Características de carregamento consideradas (valores arredondados).

Tipo	Tensão	Corrente	Potência Entregue à Bateria	Potência na Tomada	Duração
Normal	230 V - 1Ø	16 A	3 kW	3,68 kVA	3h
Rápido	400 V - 3Ø	100 A	33 kW	40 kVA	1/4h

Em [34] são analisados diagramas de carga residenciais e conclui-se que a ponta de um transformador de 25 kVA a servir cinco casas é de 14 kW. A partir da potência máxima consumida em cada barramento, sabe-se que 70% provém de consumo residencial e que cada casa contribui em média com 2,8 kW. De forma a identificar o impacto dos carregamentos, considera-se uma elevada penetração de veículos eléctricos e, por isso, assume-se que existe um veículo eléctrico por duas casas, Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Número de veículos eléctricos em cada barramento.

Barramento	Nº Veículos Eléctricos
1	0
2	5
3	30
4	20
5	15

São definidos os seguintes cenários:

Tabela 5.4 - Cenários de carregamento.

	Carregamento Normal	Carregamento Rápido	Início de Carregamento
Cenário 1	Todos	Nenhum	19h
Cenário 2	Todos	Nenhum	24h
Cenário 3	$^4/_5$	$^1/_5$	19h
Cenário 4	$^4/_5$	$^1/_5$	24h

5.2.3 Simulação

Na ponta, o sistema em análise é caracterizado por um consumo de 2,8583 MW e com perdas de 0,0583 MW. Realizadas as simulações[34] para as 24 horas interessa agora avaliar o consumo e as perdas na rede, o perfil de tensão nos barramentos e os trânsitos de potência nas linhas.

[34] S_{base} 1 MVA e V_{base} = 12,66 kV.

Em relação à evolução da potência total do sistema, Figura 5.5, observa-se que o cenário 1 e 3 resultam no aumento da potência de ponta, enquanto o cenário 2 e 4 se revelam como alternativas de carregamento das baterias no início do vazio, sem grandes impactos na rede.

O cenário 1 e 2 representam o carregamento normal. Se realizado às 19h, aumenta o consumo entre as 18 e as 22h e, como resultado, a ponta em cerca de 260 kW. Este caso é facilmente evitável agendando o carregamento para a altura do vazio. Do ponto de vista da rede, durante o vazio, o impacto é bastante baixo. A altura em que o consumo está a descer é a altura ideal para realizar o carregamento de veículos eléctrico, com o objectivo de tornar o diagrama de carga o mais estável possível, no entanto, só é aplicável a partir do ponto em que todo o carregamento pode ser disperso durante todo o vazio.

O cenário 3 é o mais problemático e, apesar do optimismo na penetração de veículos eléctricos e do uso do carregamento rápido, esta é uma situação que pode vir a acontecer no futuro. Verifica-se que um dia passaria a ter duas pontas, às 19h e às 21h. Na primeira, o consumo dispara em 1 pu (1 MW), fruto do carregamento rápido dos veículos eléctricos e do aumento normal do perfil de carga, resultante da chegada das pessoas a casa. Este aumento brusco pode ser problemático e é-lhe associada uma redução de tensão nos barramentos, Figura 5.6. Finalizados os carregamentos rápidos é atingido um novo pico com o carregamento normal que leva três horas e com o natural crescimento do consumo. A aplicação do carregamento rápido a nível doméstico e sem controlo pode originar constrangimentos locais na rede que podem facilmente ser evitáveis.

Quanto ao último caso, cenário 4, e comparando-o com o anterior, conclui-se que pelo facto do carregamento ser efectuado no vazio, o perfil quase se mantém inalterado. No entanto, com controlo inteligente pode-se dispersar o consumo durante todo o vazio, minimizando assim o impacto na rede.

No futuro, o aumento da capacidade das baterias origina um conjunto de novas exigências, entre elas, a necessidade de tornar o abastecimento dos veículos eléctricos mais rápido. Tendo em conta que, neste caso, a rapidez é sinónimo de potência, a situação pode-se tornar problemática para a rede, pois estas não estão preparadas para lidar com os trânsitos de energia que podem vir a ser exigidos. A evolução da potência eólica instalada representa um recurso distribuído, que pode desempenhar um papel importante na minimização do impacto do carregamento das baterias dos veículos eléctricos nas redes. Por outro lado, também pode representar um problema, no caso de geração excessiva.

Na Figura 5.6 indica-se a evolução da tensão no barramento mais distante da geração para os vários cenários. Pode-se concluir que o aumento de consumo no barramento baixa o seu nível de tensão. Esta situação pode-se tornar problemática em relação à qualidade de energia eléctrica e, mais uma vez, realça a oportunidade de o carregamento ser realizado durante o vazio. Nessa altura, a potência consumida pelo sistema é baixa e, por isso, conduz a

menor variação da tensão (em relação à nomial – 1 pu), como se pode confirmar pelo cenário 2 e 4.

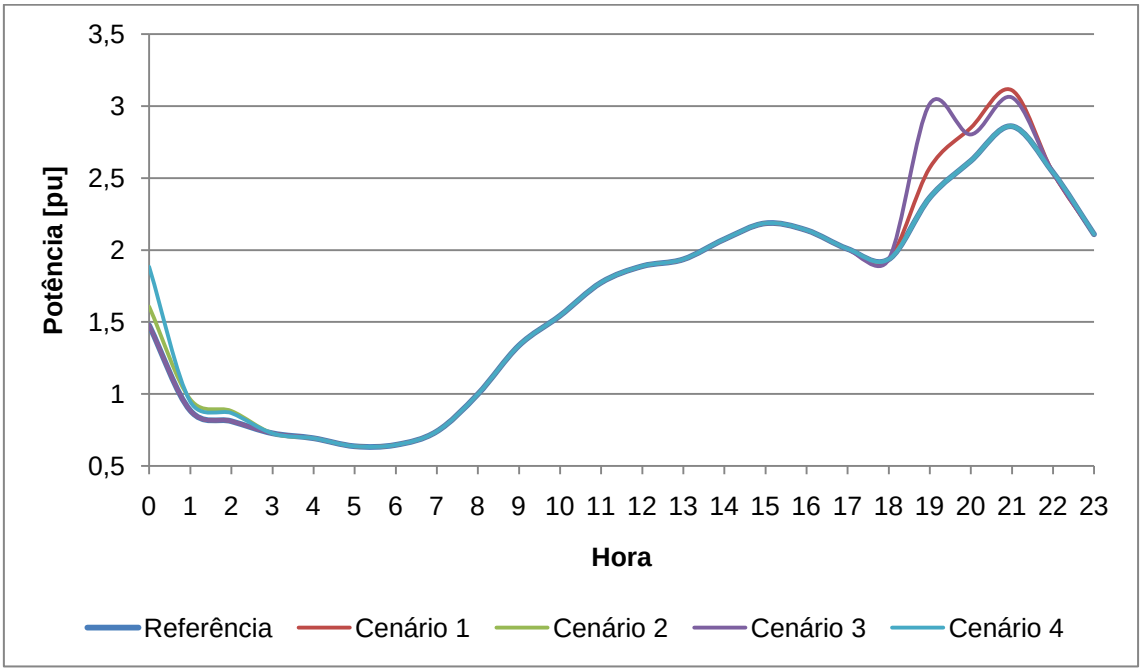


Figura 5.5 – Variação do consumo do sistema para os vários cenários.

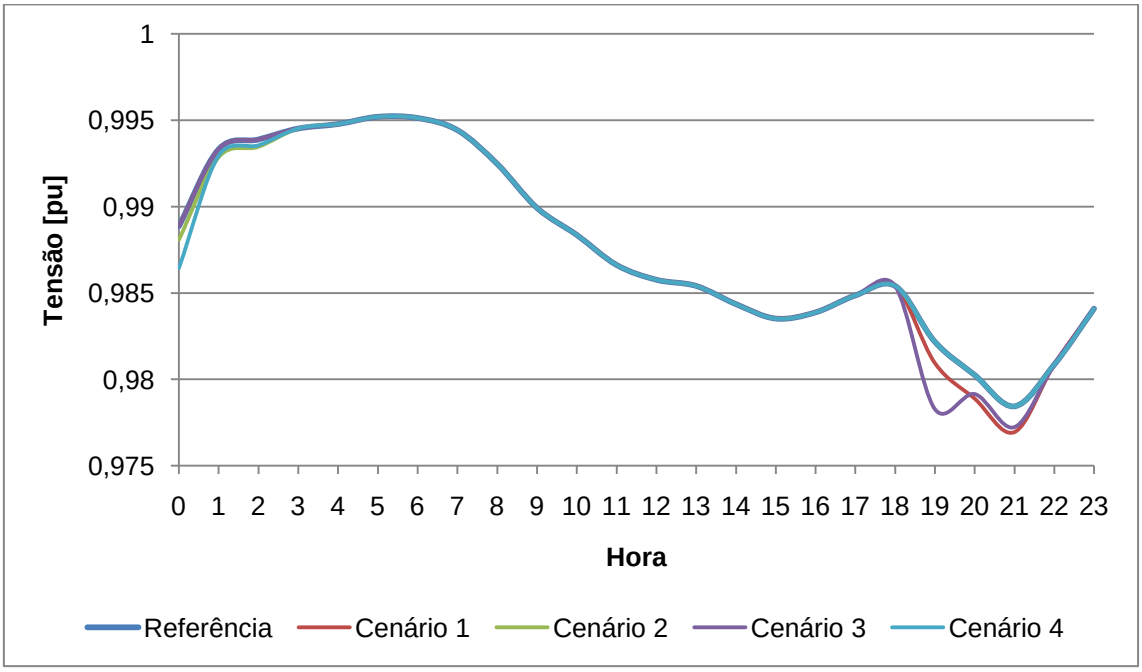


Figura 5.6 – Variação da tensão no barramento 5 para os vários cenários.

A evolução de perdas na rede de distribuição indicam-se na Figura 5.7. Estas foram calculadas em relação ao consumo total do sistema, para cada hora. Como é óbvio, o aumento

de consumo conduz a maior percentagem de perdas e é no caso 3, com o carregamento rápido e as suas elevadas necessidades de potência, em que se verifica o maior acréscimo de perdas. Em [44] é analisado o impacto da geração distribuída (eólica) na rede de distribuição e conclui-se que esse tipo de abordagem pode trazer benefícios à optimização do funcionamento a nível de redução de perdas no sistema e melhoria do perfil de tensão. Em [42] realiza-se o estudo dos PHEVs, em aplicações V2G, para efeitos de estabilização do nível de tensão. Conclui-se que os veículos eléctricos e a produção eólica podem criar um complexo sistema de forma a atenuar o impacto na rede de cada unidade separadamente e melhorar a qualidade de energia eléctrica. Com produção eólica excessiva, os veículos eléctricos na vizinhança entram em modo de carregamento, reduzindo as perdas e a propagação do aumento de tensão em redor do sistema. Com produção eólica baixa ou consumo elevado, os veículos eléctricos fornecem energia à rede, de forma a reduzir perdas, redução de tensão e controlar o trânsito de energia. No planeamento de instalação de pontos de carregamento rápido dever-se-á ter em conta todos estes factores de forma a atenuar o seu impacto na rede.

Na Tabela 5.5 determinou-se a variação de potência que transita nas linhas, durante os carregamentos, para os vários cenários (em relação à referência). Quanto ao carregamento normal, cenário 1 e 2, a variação é de quase 9%, no entanto, para o carregamento rápido, o acréscimo é de cerca de 28%. Apesar destas variações e assumindo que durante a ponta de referência cada linha se encontra a 70% da sua capacidade, registaram-se as seguintes utilizações máximas das linhas no pior caso, Tabela 5.6. Verifica-se que ainda existe espaço de manobra, mas se a ideia é substituir todo o parque automóvel, sem impactos na rede, o carregamento terá que ser efectuado durante o vazio, e as tarifas têm de ser atractivas, cabendo ao regulador o papel de incentivador.

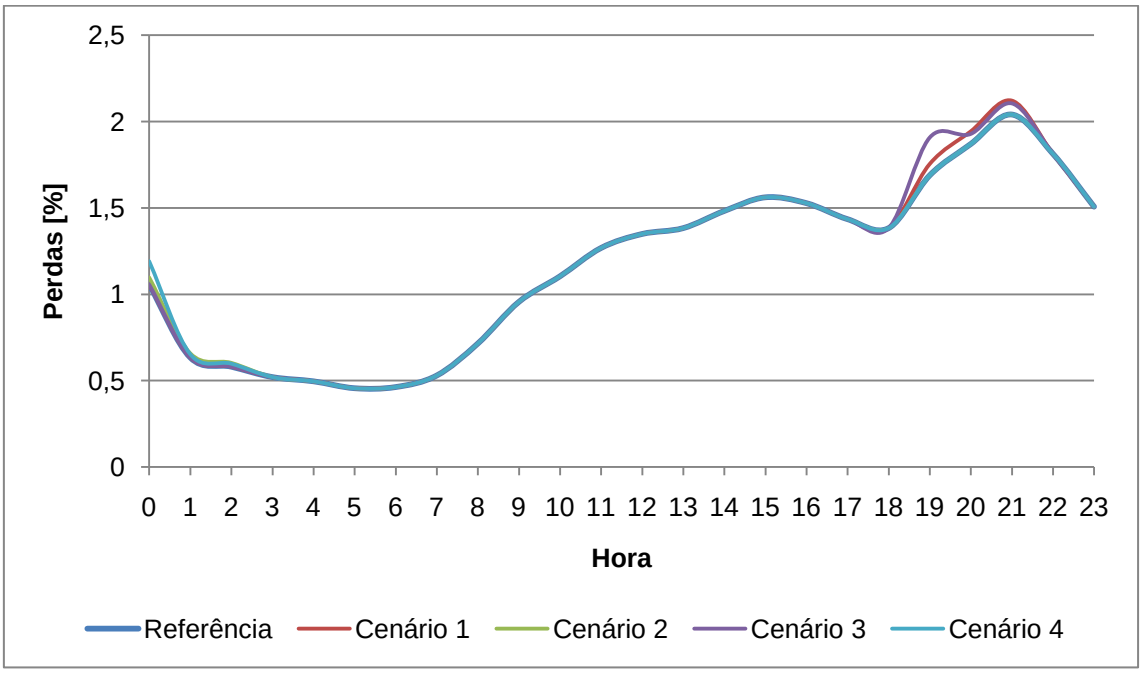


Figura 5.7 – Variação das perdas na rede de distribuição.

Tabela 5.5 – Variação da potência que transita nas linhas para os vários cenários.

Hora	Referência [pu]				Cenário 2 [%]				Cenário 4 [%]			
	P12	P23	P34	P45	P12	P23	P34	P45	P12	P23	P34	P45
0	1,4769	1,3704	0,7338	0,3138	8,79	8,78	8,75	8,75	27,50	27,49	27,38	27,35
1	0,8856	0,8220	0,4412	0,1888	8,77	8,77	8,75	8,74	7,01	7,01	7,00	7,00
2	0,8109	0,7527	0,4040	0,1729	8,77	8,76	8,75	8,74	7,01	7,01	7,00	7,00
3	0,7269	0,6747	0,3623	0,1551								
4	0,6927	0,6430	0,3453	0,1478								
5	0,6369	0,5912	0,3176	0,1360								
6	0,6462	0,5998	0,3222	0,1380								
7	0,7393	0,6863	0,3685	0,1577								
8	0,9978	0,9261	0,4968	0,2126								
9	1,3356	1,2394	0,6640	0,2840								
10	1,5429	1,4316	0,7664	0,3277								
11	1,7730	1,6449	0,8798	0,3760								
12	1,8868	1,7503	0,9358	0,3999								
13	1,9342	1,7942	0,9591	0,4098								
14	2,0736	1,9234	1,0276	0,4390								
15	2,1847	2,0263	1,0822	0,4623								
16	2,1370	1,9822	1,0588	0,4523								
17	2,0070	1,8617	0,9949	0,4251	Cenário 1 [%]				Cenário 3 [%]			
18	1,9342	1,7942	0,9591	0,4098	P12	P23	P34	P45	P12	P23	P34	P45
19	2,3627	2,1913	1,1695	0,4994	8,81	8,81	8,76	8,74	27,61	27,58	27,41	27,35
20	2,6179	2,4276	1,2944	0,5525	8,83	8,82	8,77	8,75	7,06	7,05	7,01	7,00
21	2,8583	2,6502	1,4117	0,6025	8,83	8,82	8,76	8,74	7,06	7,06	7,01	6,99
22	2,5381	2,3537	1,2553	0,5359								
23	2,1084	1,9557	1,0447	0,4463								

Tabela 5.6 – Variação da utilização da capacidade da linha.

	P12	P23	P34	P45
Referência	2,8583	2,6502	1,4117	0,6025
Cenário 1	3,1107	2,8839	1,5355	0,6551
Variação	8,83%	8,82%	8,76%	8,74%
Uso Capacidade	78,83%	78,82%	78,76%	78,74%

6 Conclusões

Portugal, como país pioneiro da mobilidade eléctrica, já iniciou a instalação de uma rede de pontos de carregamento integrada e vai ser dos primeiros países a receber os veículos eléctricos de nova geração. A aposta na mobilidade eléctrica visa, simultaneamente, objectivos energéticos – redução da dependência energética externa de combustíveis fósseis, que deterioram substancialmente a balança comercial do País, ambientais – redução da poluição atmosférica e das emissões de CO_2, em particular, bem como a redução dos níveis de ruído, que contribuem para a melhoria da qualidade de vida das cidades, e económico-sociais – redução da factura de mobilidade das famílias e empresas que optem por esta solução alternativa de mobilidade [16].

Após o sucesso dos HEVs, as marcas automóveis apostam agora nos EVs e PHEVs. Tudo indica que o Nissan Leaf e o Opel Ampera serão os primeiros desse tipo, respectivamente, a chegar ao mercado e, não passará muito tempo, até estes modelos terem concorrência. A maioria das marcas já anunciou o lançamento de veículos com características similares, no próximo ano – 2011. A indústria automóvel vê esta aposta como uma forma de relançar a economia. Os veículos ICE (eléctricos) são caracterizados por: baixo (alto) preço, autonomia elevada (baixa), preço por quilómetro alto (baixo) e emissões altas (baixas ou nulas[35]). No entanto, existe uma constante evolução da sua eficiência, de forma a reduzir o seu consumo e emissões. A penetração de veículos eléctricos no parque automóvel em Portugal depende, sobretudo, da condição económica do país, dos incentivos, do preço e da autonomia (**baterias**) do veículo.

Do ponto de vista do SEN, o problema associado à mobilidade eléctrica reside no abastecimento destes veículos. Dependendo do nível de potência, da hora e da duração do carregamento, pode resultar uma diversidade de impactos no sistema, a nível de geração necessária e, como consequência, de emissões e aumento da potência de ponta. Analisados todos os cenários de acordo com todas as considerações feitas, conclui-se que é fundamental forçar o carregamento dos veículos para as zonas de menor consumo, ou seja, para o vazio. Como se prevê que a maioria do carregamento será realizado em casa, depende do proprietário garantir que tal aconteça usando, para esse efeito, o sistema de agendamento de carga do veículo ou outra alternativa. Esta situação é vantajosa (€) para o condutor, caso tenha uma tarifa diferente para o vazio. Ao nível do sistema, além de prevenir os problemas já referidos, existe também redução de custos (em relação ao carregamento realizado na ponta). O despacho das centrais eléctricas é realizado de acordo com o seu custo marginal. A curto prazo, a carga adicional proveniente dos veículos eléctricos irá ser despachada por centrais de baixo custo marginal, ou seja, carvão e gás natural que, por sua vez, podem reduzir os benefícios ambientais destes veículos, mas também por fontes de energia renovável. A longo

[35] Localmente.

prazo, a criação de políticas relacionadas com a redução de emissões poderá encorajar a introdução de geração adicional de baixas emissões, por exemplo, energia nuclear. De acordo com o cenário mais problemático e das estimativas de instalação de geração até 2020, tudo indica que não serão registados problemas ao nível do sistema, apenas na ocorrência de um ano anormalmente seco.

O grande movimento a favor da mobilidade eléctrica é o potencial na redução de emissões. No entanto, é necessário contabilizar as emissões originadas no carregamento das baterias dos veículos eléctricos e podem ser estimadas de acordo com a produção total anual e emissões específicas por fonte. Como se concluiu, estas dependem do *mix* energético de cada país e revelam um enorme potencial quando têm forte peso de renováveis e/ou nuclear.

Em relação ao impacto dos veículos eléctricos na rede de distribuição, considerando uma grande massificação destes, verifica-se novamente a importância do carregamento ser realizado durante o vazio. Em Portugal, a instalação de pontos de carregamento rápido será realizada em postos de abastecimento de combustível. Os veículos eléctricos têm baixa autonomia (capacidade das baterias) e o carregamento destes é demorado. No futuro, caso a mobilidade eléctrica vingue, estes veículos terão maior autonomia, baterias com maior capacidade, e, por isso, deverão surgir exigências quanto ao tempo de carregamento que implica maiores trânsitos de energia. Foi por isso analisado o impacto deste no uso doméstico, em que se considerou que um quinto dos veículos o usava. Se este tipo de carregamento não for controlado, o impacto na rede pode ser catastrófico. O nível de potência exigido é bastante elevado e algumas linhas poderão ficar sobrecarregadas.

A mobilidade eléctrica e a geração eólica podem-se tornar aliados na optimização conjunta das redes. Com funcionalidades V2G, os veículos eléctricos podem funcionar como carga ou geração distribuída. Desta forma e interligando estes dois sistemas, podem-se reduzir as perdas nas redes e diminuir as variações de tensão e, como resultado, é garantida a qualidade de energia eléctrica. Com excesso de produção eólica, os veículos eléctricos entram em carregamento e, nas horas de consumo mais elevado, ambos os sistemas podem fornecer energia. A bombagem é um exemplo desta tendência, ocorre durante os períodos de vazio, armazenando energia para os períodos em que ela é necessária. Desta forma, pode-se evitar a produção com maior número de arranques de grupos e em regimes de menor rendimento, situações que conduzem a acrescidos custos de operação e manutenção. A aplicação do V2G poderá ajudar o desenvolvimento de *smart grids*.

6.1 Perspectiva de Trabalho Futuro

O caso Português é único a nível mundial, enquanto a maioria dos países estão a criar uma rede de pontos de carregamento em algumas cidades, Portugal está a implementar uma

rede integrada de pontos de carregamentos a nível nacional. Isto pode colocar o nosso país na linha da frente na investigação da mobilidade eléctrica e sua interacção com a rede e criar oportunidades na indústria, numa altura em que o país pode entrar em recessão.

Existem diversos temas ligados à mobilidade eléctrica sendo as aplicações V2G o mais atraente. Tendo em conta a elevada penetração de energia eólica até 2020 e o início da comercialização de veículos eléctricos, Portugal tem todas as condições para entrar em fases de testes de aplicações V2G. Torna-se necessário:

- Caracterizar toda a infraestrutura necessária para aplicações V2G.
- Conceber algoritmos de forma a realizar o despacho óptimo de sistemas constituídos por geração distribuída (maioritariamente eólica) e por frotas de veículos eléctricos que possibilitam V2G.
- Analisar os períodos de compra e venda de energia eléctrica e avaliar as condições económicas em que estas se teriam que realizar para se tornarem atractivas para os proprietários dos veículos.

Referências Bibliográficas

[1] IEA, *Key World Energy Statistics*, 2007

[2] M. Ehsani, Y. Gao, A. Emadi, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*, Second Edition, CRC Press, 2010.

[3] N. Reis, *O automóvel híbrido como elemento fornecedor-consumidor de electricidade*, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, 2008.

[4] C.C. Chan, *The State of the Art of Electric and Hybrid Vehicles*, IEEE, vol. 90, pp.247-275, 2002.

[5] C.C. Chan, *The State of the Art of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles*, IEEE, vol. 95, pp.704-718, 2007.

[6] J. Moreno, J. Dixon, M. Ortúzar, *Energy Management System for an Hybrid Electric Vehicle, Using Ultracapacitors and Neural Networks*, IEEE.

[7] J. Kessels, M. Koot, P. Bosch, D. Kok, *Online Energy Management for Hybrid Electric Vehicles*, IEEE, vol. 57, pp.3428-3440, 2008.

[8] T. Teratani, R. Mizutani, K. Yamamoto, T. Anegawa, *Energy-saving Technologies for Automobiles*, IEEj Trans, pp.162-175,2008.

[9] A. Srivastava, B. Annabathina, S. Kamalasadan, *The Challenges and Policy Options for Integrating Plug-in Hybrid Electric Vehicle into the Electric Grid*, The Electricity Journal, vol. 23, Issue 3, 2010.

[10] J. Axsen, A. Burke, K. Kurani, *Batteries for Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs): Goals and the State of Technology circa 2008*, Institute of Transportation Studies, University of California, 2008.

[11] L. Lave, H. Maclean, *Are Hybrid Vehicles Worth It?*, IEEE Spectrum, 2001.

[12] F. Nemry, G. Leduc, A. Muñoz, *Plug-in Hybrid and Battery-Electric Vehicles: State of the research and development and comparative analysis of energy and cost efficiency*, JRC Technical Notes, 2009.

[13] P. Duque, *Autonomização de um Veículo Eléctrico Utilizando Formas Distintas de Armazenamento e Recuperação de Energia*, Trabalho de Final de Curso, Instituto Superior Técnico, 2007.

[14] P. Mendonça, *Concepção e Requisitos de um Sistema de Recarregamento de um Veículo Eléctrico*, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, 2008.

[15] D. Foito, *Veículo Eléctrico Bimotor com controlo de estabilidade e de tracção*, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, 2002.

[16] Decreto-Lei n.º 39/2010, de 26 de Abril.

[17] www.mobi-e.pt

[18] C. Samaras, *A Life-Cycle Approach To Technology, Infrastructure, And Climate Policy Decision Making: Transitioning To Plug-In Hybrid Electric Vehicles And Low-Carbon Electricity*, Carnegie Mellon University, 2008.

[19] P. Vaz, *Previsão geográfica de alteração do padrão de consumo eléctrico devido à evolução da penetração de consumos de veículos eléctricos*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.

[20] www.acap.pt
[21] www.dgge.pt
[22] www.novaenergia.net/pontosdecarga
[23] www.nissan.pt
[24] www.opel-ampera.com
[25] www.ren.pt
[26] www.edp.pt
[27] W. Kempton, J. Tomie, *Vehicle-to-grid fundamentals: Calculating capacity and net revenue*, J. Power Sources Volume 144, Issue 1, 1 June 2005, Pages 268-279.
[28] W. Kempton, J. Tomie, *Vehicle-to-grid Implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy*, J. Power Sources Volume 144, Issue 1, 1 June 2005, Pages 280-294.
[29] República Portuguesa, *Plano de Acção Nacional para as Energias Renováveis ao Abrigo da Directiva 2009/28/CE*, versão para consulta pública, 2010.
[30] R. Castro, *Energias Renováveis e Produção Descentralizada – Introdução à Energia Eólica*, 4ª edição, Instituto Superior Técnico, 2009.
[31] R. Castro, *Energias Renováveis e Produção Descentralizada – Introdução à Energia Fotovoltaica*, 3ª edição, Instituto Superior Técnico, 2009.
[32] B. Kampman, C. Leguijt, D. Bennink, L. Wielders, X. Rijkee, A. Buck, W. Braat, *Green Power for Electric Cars – Development of policy recommendations to harvest the potential of electric vehicles*, Delft Report, 2010.
[33] C. Camus, C. Silva, T. Farias, J. Esteves, *Impact of Plug-in Hybrid Electric Vehicles in the Portuguese Electric Utility System*, IEEE, 2009.
[34] S. Shao, M. Pipattanasomporn, S. Rahman, *Challenges of PHEV Penetration to the Residential Distribution Network*, IEEE, 2009.
[35] K. Parks, P. Denholm, T. Markel, *Cost and Emissions Associated with Pug-In Hybrid Electric Vehicle Charging in the Xcel Energy Colorado Service Territory*, NREL Technical Report, 2007.
[36] www.sae.org
[37] www.iec-normen.de
[38] www.mennekes.de
[39] www.imtt.pt
[40] ERSE, *Comércio Europeu de Licenças de Emissão de Gases de Efeito de Estufa – Análise para Portugal – Período 2005-2008*, 2009.
[41] www.ree.es
[42] M. Chehaly, O. Saadeh, C. Martinez, G. Joos, *Advantages and Applications of Vehicle to Grid Mode of Operation in Plug-In Hybrid Electric Vehicles*, IEEE, 2009.
[43] S. Paiva, *Redes de Energia Eléctrica: uma análise sistémica*, IST Press, 2007.
[44] N. Fernandes, *Impacto da Ligação de Geradores Eólicos na Rede de Distribuição*, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, 2010.

Anexo A Mercado

A.1 EVs

Apresentam-se de seguida alguns EVs disponíveis no mercado.

Tabela A.1 – Alguns modelos EVs actualmente em produção [27], [28].

Fabricante	Modelo	Tipo de Bateria	Autonomia [km]	Velocidade Máxima [km/h]
CommuterCars	Tango	Lead-Acid Li-Ion	96-128 Mais de 240	220
Elbil Norge	Buddy	Lead-Acid	80-120 km	80
Reva	G-Wiz	Lead-Acid Li-Ion	80 120	80
Tesla	Roadster	Li-Ion	380	201
Think	A306	ZEBRA (NaAlCl4)	210	105
Venturi	Fetish	Li-Ion	250	160

Além destes veículos algumas marcas já anunciaram novos modelos de EVs que em breve irão entrar em produção.

O Tesla Roadster, Figura A.1.1, revolucionou a indústria automóvel, foi o primeiro EV de produção a usar baterias Li-Ion e com uma autonomia superior a 320 km. De referir também o Venturi Fetish, Figura A.1.2. Estes dois veículos puramente eléctricos apresentam um design moderno e características interessantes, contudo o seu avultado preço quando comparados ao veículo convencional não os tornam como uma alternativa para quem quer, mas sim para quem pode.

Existem no entanto inúmeros modelos que se encontram ainda em fase de testes.

Figura A.1 – Tesla Roadster (84000€).

Figura A.2 – Venturi Fetish (297000€) edição limitada.

A.2 HEVs

Apresentam-se de seguida alguns HEVs disponíveis no mercado.

Tabela A.2 – Alguns modelos HEVs actualmente em produção [27].

Fabricante	Modelo
Chevrolet	Tahoe Hybrid
Ford	Escape Hybrid
Ford	Escape Hybrid II
Ford	Fusion Hybrid
GMC	Yukon Hybrid
Honda	Civic Hybrid II
Lexus	RX400h
Lexus	GS 450h
Mercury	Mariner Hybrid
Mercury	Milan Hybrid
Nissan	Altima Hybrid
Toyota	Prius III
Toyota	Camry Hybrid
Toyota	Highlander Hybrid

Actualmente grande parte dos fabricantes automóveis já têm modelos híbridos, ou estão a planear lançar.

De salientar no entanto o grande interesse das marcas automóveis de oferecer PHEVs. O PHEV Chevrolet Volt é um desses exemplos com lançamento marcado para o final de 2010.

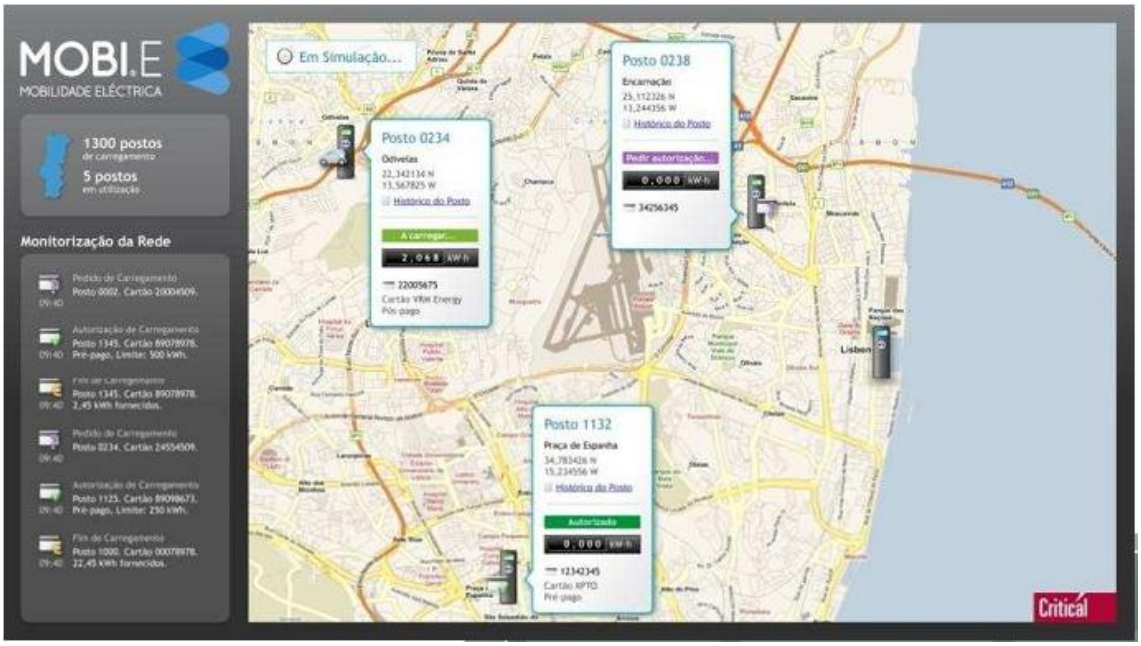
Figura A.3 – Chevrolet Volt.

Anexo B Impacto no SEN

B.1 Evolução do Parque Automóvel Eléctrico em Portugal

	Venda Veículos	Pessimista		Base		Optimista	
		Veículos Eléctricos	Acumulado	Veículos Eléctricos	Acumulado	Veículos Eléctricos	Acumulado
2011	196.950	492	492	985	985	4.924	4.924
2012	198.920	757	1.249	1.580	2.565	7.379	12.302
2013	200.909	1.163	2.412	2.532	5.097	10.992	23.294
2014	202.918	1.784	4.196	4.045	9.143	16.233	39.527
2015	204.947	2.733	6.929	6.436	15.578	23.681	63.208
2016	206.996	4.178	11.108	10.170	25.748	33.962	97.170
2017	209.066	6.364	17.471	15.906	41.654	47.610	144.780
2018	211.157	9.641	27.112	24.496	66.150	64.828	209.608
2019	213.269	14.493	41.605	36.890	103.040	85.226	294.834
2020	215.401	21.540	63.145	53.850	156.890	107.701	402.534
	Parâmetros de Previsão	α	-5,9890	α	-5,2933	α	-3,6636
		β	0,4213	β	0,4661	β	0,4071
	Nível de Penetração	Inicial	0,25%	Inicial	0,50%	Inicial	2,50%
		Final	10%	Final	25%	Final	50%

B.2 MOBI.E


MOBI.E
MOBILIDADE ELÉCTRICA
1300 postos
de carregamento
5 postos
em utilização
Monitorização da Rede
Em Simulação...
Posto 0234
Posto 0238
Posto 1132
Praça de Espanha
Lisbon
Critical

Total de energia fornecida:
67.123 kWh
Média de abastecimentos:
953 kWh por mês
37 veículos por mês
Frequência de utilização:
Muito Usado
Localização GPS:
34,458474 N
22,378435 W
Energia fornecida
Veículos abastecidos
Percentagem de abastecimentos por fornecedor
36%
48%
16%
Histórico de Carregamentos
Data | Hora | Duração | Carga | Cartão | Tipo | Fornecedor | Motivo do fim do carregamento
Hoje | 09:24 - 10:25 | 01h 01m | 12,3421 kWh | 34597847 | Pré-pago | ABC Energy | Fim do saldo
Hoje | 08:12 - 09:10 | 00h 58m | 14,9845 kWh | 10091511 | Pré-pago | YZX | Terminado pelo utilizador
Ontem | 20:24 - 21:44 | 01h 20m | 14,0021 kWh | 23423490 | Pré-pago | YZX | Terminado pelo utilizador
Ontem | 17:00 - 20:03 | 03h 03m | 22,2309 kWh | 10098909 | Pós-pago | ABC Energy | Terminado pelo utilizador
Ontem | 10:30 - 14:56 | 04h 36m | 18,6700 kWh | 23423454 | Pré-pago | PWR | Terminado pelo utilizador
Ontem | 09:24 - 09:59 | 00h 47m | 3,4533 kWh | 23452345 | Pré-pago | YXZ | Fim de saldo
27-06-2009 | 17:10 - 17:40 | 00h 40m | 8,4512 kWh | 77798004 | Pós-pago | ABC Energy | Terminado pelo utilizador
27-06-2009 | 13:10 - 13:33 | 00h 23m | 8,4512 kWh | 77798004 | Pós-pago | ABC Energy | Terminado pelo utilizador

B.3 Evolução da potência térmica instalada em Portugal

Tabela B.1 – Cronograma da entrada em funcionamento das novas CCGT.

Novos grupos térmicos de base	Potência liq. (MW)	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
CCGT Lares I	415												
CCGT Lares II	415												
CCGT Pego I	415												
CCGT Pego II	415												
CCGT Sines I	415												
CCGT Sines II	415												
CCGT Lavos I	415												
CCGT Lavos II	415												

B.4 Evolução da potência renovável instalada em Portugal

Tabela B.2 – Estimativa do contributo total previsível de cada tecnologia baseada em fontes de energia renovável e a trajectória indicativa das quotas de energia proveniente de fontes renováveis no sector da electricidade em 2010-2014.

	2005		2010		2011		2012		2013		2014	
	MW	GWh	MW	GWh	MW	GWh	MW	GWh	MW	GWh	MW	GWh
Hidroeléctrica:	**4 819**	**5 103**	**4 990**	**10 507**	**5 037**	**10 047**	**5 790**	**11 065**	**5 790**	**10 918**	**6 082**	**11 245**
1MW – 10 MW	298	347	410	755	457	840	503	925	503	925	550	1 012
>10MW	4 493	4 723	4 580	9 752	4 580	9 206	5 287	10 140	5 287	9 993	5 532	10 233
Da qual por bombagem	537	387	1 036	0	1 036	0	1 292	0	1 463	0	1 463	0
Geotérmica	**18**	**71**	**30**	**222**	**30**	**222**	**30**	**222**	**30**	**222**	**30**	**222**
Solar:	**3**	**4**	**164**	**250**	**232**	**358**	**310**	**481**	**430**	**694**	**580**	**976**
Fotovoltaica	3	4	151	223	205	303	270	398	330	487	380	561
Solar concentrada	0	0	13	28	27	55	40	83	100	208	200	415
Marés, ondas, oceanos	**0**	**0**	**10**	**1**	**17**	**5**	**23**	**12**	**48**	**24**	**48**	**48**
Eólica:	**1 065**	**2 556**	**4 256**	**10 002**	**4 928**	**11 458**	**5 600**	**12 755**	**5 600**	**12 755**	**5 600**	**12 755**
Terrestre	1 065	2 556	4 256	10 002	4 928	11 458	5 600	12 755	5 600	12 755	5 600	12 755
Offshore	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Biomassa:	**474**	**1 988**	**672**	**2 352**	**773**	**2 706**	**888**	**3 108**	**888**	**3 108**	**913**	**3 196**
Sólida	178	746	286	1 000	310	1 086	335	1 173	335	1 173	335	1 173
Biogás	9	39	39	138	53	184	80	280	80	280	105	368
Bioliquidos[28]	287	1 203	347	1 215	410	1 435	473	1 656	473	1 656	473	1 656
TOTAL	**6 379**	**9 721**	**10 123**	**23 334**	**11 017**	**24 795**	**12 641**	**27 643**	**12 786**	**27 721**	**13 253**	**28 441**
Da qual em PCCE	**367**	**149**	**436**	**2 115**	**436**	**2 115**	**436**	**2 115**	**436**	**2 115**	**436**	**2 115**
Biomassa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sólida	**367**	**149**	**436**	**2 115**	**436**	**2 115**	**436**	**2 115**	**436**	**2 115**	**436**	**2 115**
Biogás	76	31	140	679	140	679	140	679	140	679	140	679
Bioliquidos	4	2	12	58	12	58	12	58	12	58	12	58

Tabela B.3 – Estimativa do contributo total previsível de cada tecnologia baseada em fontes de energia renovável e a trajectória indicativa das quotas de energia proveniente de fontes renováveis no sector da electricidade em 2015-2020.

	2015		2016		2017		2018		2019		2020	
	MW	GWh	MW	GWh	MW	GWh	MW	GWh	MW	GWh	MW	GWh
Hidroeléctrica:	**7 073**	**11 091**	**8 145**	**11 891**	**8 195**	**11 983**	**9 648**	**14 141**	**9 784**	**14 259**	**9 834**	**14 351**
1MW - 10 MW	550	1 012	600	1 104	650	1 196	650	1 196	700	1 288	750	1 380
>10MW	6 523	10 080	7 545	10 787	7 545	10 787	8 998	12 945	9 084	12 971	9 084	12 971
Da qual por bombagem	2 879	0	3 214	0	3 532	0	4 422	0	4 422	0	4 422	0
Geotérmica	**30**	**222**	**30**	**222**	**30**	**222**	**30**	**222**	**50**	**370**	**50**	**370**
Solar:	**630**	**1 050**	**860**	**1 479**	**1 105**	**1 931**	**1 220**	**2 100**	**1 360**	**2 307**	**1 500**	**2 513**
Fotovoltaica	430	634	510	752	605	892	720	1 062	860	1 269	1 000	1 475
Solar concentrada	200	415	350	727	500	1 038	500	1 038	500	1 038	500	1 038
Marés, ondas, oceanos	**48**	**48**	**73**	**110**	**73**	**110**	**73**	**146**	**150**	**375**	**150**	**375**
Eólica:	**6 100**	**13 573**	**6 100**	**13 420**	**6 100**	**13 268**	**6 700**	**14 428**	**6 950**	**14 793**	**6 950**	**14 620**
Terrestre	6 100	13 359	6 100	13 359	6 100	13 359	6 650	14 298	6 900	14 663	6 900	14 490
Offshore	0	0	0	0	0	0	50	130	50	130	50	130
Biomassa:	**913**	**3 196**	**928**	**3 248**	**928**	**3 248**	**943**	**3 301**	**943**	**3 301**	**958**	**3 353**
Sólida	335	1 173	335	1 173	335	1 173	335	1 173	335	1 173	335	1 173
Biogás	105	368	120	420	120	420	135	473	135	473	150	525
Bioliquidos[29]	473	1 656	473	1 656	473	1 656	473	1 656	473	1 656	473	1 656
TOTAL	**14 794**	**29 179**	**16 136**	**30 369**	**16 431**	**30 760**	**18 614**	**34 337**	**19 237**	**35 403**	**19 442**	**35 582**
Da qual em PCCE	**436**	**2 115**	**436**	**2 115**	**436**	**2 115**	**436**	**2 115**	**436**	**2 115**	**436**	**2 115**
Biomassa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sólida	**436**	**2 115**	**436**	**2 115**	**436**	**2 115**	**436**	**2 115**	**436**	**2 115**	**436**	**2 115**
Biogás	140	679	140	679	140	679	140	679	140	679	140	679
Bioliquidos	12	58	12	58	12	58	12	58	12	58	12	58

Anexo C Parâmetros da rede de distribuição radial de cinco barramentos

Tabela C.1 – Dados dos barramentos [44].

Nº	kV	Carga	
		$P_D\ [kW]$	$Q_D\ [kVar]$
1	12,66	0	0
2	12,66	200	100
3	12,66	1200	900
4	12,66	800	600
5	12,66	600	800

Tabela C.2 – Dados das linhas [44].

De	Para	$R\ [\Omega]$	$X\ [\Omega]$
1	2	0,0922	0,0470
2	3	0,4930	0,2511
3	4	0,3660	0,1864
4	5	0,3811	0,1941